

การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์จากยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF POLYMERIC FILM FROM NATURAL RUBBER BLENDED WITH POTATO  
STARCH



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science  
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์จากยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง
โดย	น.ส.นันทรี ฉัตรยาลักษณ์
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

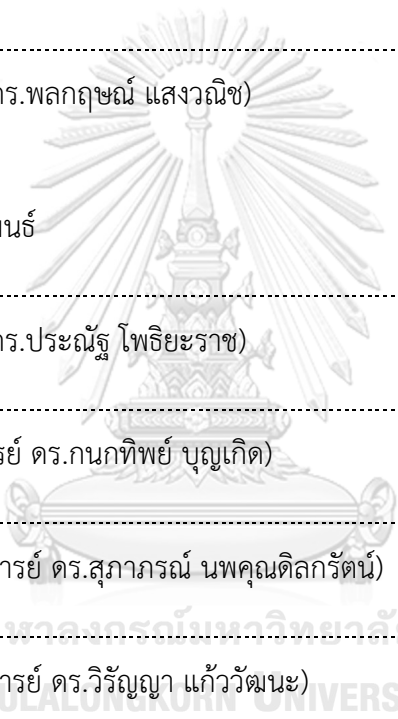
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณติลกรัตน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัญญา แก้ววัฒนะ)



นัทรี ฉัตรยาลักษณ์ : การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์จากยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง. ( PREPARATION OF POLYMERIC FILM FROM NATURAL RUBBER BLENDED WITH POTATO STARCH) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ตั้งแต่ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน สำหรับ 2 ส่วนแรก จะเป็นแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล โดยส่วนแรกเตรียมได้จากการผสมสารแขวนลอยของน้ำแป้งกับน้ำยางธรรมชาติโดยจะเรียกว่า latex mixing จากนั้นทำให้แห้งแล้วนำไปผสมกับสารเคมียางในเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ในขณะที่ส่วนที่สองยางธรรมชาติจะถูกผสมกับแป้งมันฝรั่งในเครื่องผสมแบบปิด โดยจะเรียกว่า dry mixing จากนั้นนำไปผสมกับสารเคมียางในเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งต่อไป และในส่วนที่สามจะเป็นการเติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 แทนกลีเซอรอล จากนั้นทำการขึ้นรูปตัวอย่างแผ่นฟิล์มเพื่อนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ เชิงกลและความร้อนด้วยแม่พิมพ์แบบกดอัดที่อุณหภูมิ 155 °C จากการตรวจสอบแผ่นฟิล์มด้วยตาเปล่าจะเห็นได้ว่า แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing เกิดการแยกเฟสระหว่างยางธรรมชาติและแป้งมันฝรั่งน้อยกว่าที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมกลีเซอรอลช่วยลดการเกาะกลุ่มกันของแป้งมันฝรั่งได้ จากการทดสอบการบวมตัวในน้ำพบว่า การเติมแป้งมันฝรั่งทำให้แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งดูดซับน้ำได้และปริมาณการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งที่เติม โดยที่อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อแป้งมันฝรั่งเดียวกัน แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing มีการดูดซับน้ำได้สูงกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing และการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมกลีเซอรอล เมื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าการเติมแป้งมันฝรั่งทำให้แผ่นฟิล์มมีสมบัติเชิงกลลดลง ยิ่งเติมมากก็ยิ่งลดลงมาก แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing มีความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing แต่ให้ความแข็งแรงที่ต่ำกว่า การเติมกลีเซอรอลช่วยเพิ่มความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดแต่ลดความแข็งแรงของแผ่นฟิล์ม สำหรับการสลายตัวทางความร้อนพบว่า การเติมแป้งมันฝรั่งลงในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลจากเทคนิคการเตรียมทั้ง 2 แบบ ส่งผลให้ยางธรรมชาติซึ่งเป็นเฟสหลักมีแนวโน้มที่จะสลายตัวที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น เมื่อเติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 แทนการเติมกลีเซอรอล พบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ได้มีความสามารถในการดูดซับน้ำและความทนต่อแรงดึงที่ดียิ่งขึ้น แต่ความต้านทานต่อการฉีกขาดกลับมีค่าต่ำที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์  
ปีการศึกษา 2562

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

# # 5972124223 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: NATURAL RUBBER, POTATO STARCH, GLYCEROL, SILANE, POLYMER BLEND

Nattaree Chatyaluck : PREPARATION OF POLYMERIC FILM FROM NATURAL RUBBER BLENDED WITH POTATO STARCH. Advisor: Assoc. Prof. KANOKTIP BOONKERD, Ph.D.

The objective of this research is to prepare polymer blends from natural rubber (NR) mixed with potato starch (PS) at various ratios from 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 and 50/50. The experiment can be divided into 3 parts. For the first 2 parts, it was NR/PS film with and without glycerol. For the first part, polymer blend was prepared by mixing the suspension of starch with NR latex, which was called as latex mixing. Then the dried polymer was mixed with rubber chemicals using a two-roll mill. While for the second part, NR was mixed directly with PS using an internal mixer called as dry mixing. Then the obtained mixture was mixed with rubber chemicals using a two-roll mill. And for the third part, the silane coupling agent Si-69 was replaced glycerol. The compound was compression-molded at 155 °C to form film for further testing in physical, mechanical and heat properties. From the investigation of the film with naked eyes, it can be seen that NR film mixed with PS prepared from a dry mixing showed less phase separation than that obtained by latex mixing. Moreover, it was found that adding glycerol reduced the agglomeration of PS. From the swelling test, it was found that PS caused the NR film to absorb water and the % water absorption increased with increasing PS. At the same NR/PS ratio, the NR/PS film prepared by latex mixing had higher water absorption than the one prepared by dry mixing. Moreover, the % water absorption increased with the presence of glycerol. The addition of PS caused the reduced mechanical properties. The more PS, the lower mechanical properties. However, it was found that the NR/PS film prepared by dry mixing had higher tensile strength and tear resistance but lower hardness than the one prepared latex mixing. The addition of glycerol improved tensile strength and tear resistance but reduced hardness of the NR/PS film. For thermal decomposition, it was found that the addition of PS to NR film in both with and without glycerol resulted in NR, which is the main phase, prone to decompose at higher temperature. Lastly, when replacing glycerol with silane coupling agent Si-69, it was found that the NR/PS film showed better water absorption and tensile strength but lower tear strength.

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study:	Petrochemistry and Polymer Science	Student's Signature .....
Academic Year:	2019	Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วง เนื่องจากได้รับความกรุณาและอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ทั้งคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ สถานที่ในการทำงานวิจัย อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องดังรายนามต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็นต่างๆ คำแนะนำ แนะนำแนวทางในการดำเนินงาน รวมถึงการแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

2. คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำจนสามารถนำมาพัฒนาเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

3. บุคลากรภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในเรื่องสถานที่ ให้ความรู้เกี่ยวกับการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ รวมถึงความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการภายในภาควิชา

4. รุ่นพี่และเพื่อน ในหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ และในภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือ ตลอดจนให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

5. ขอขอบคุณ Green Materials for Industrial Application Research Unit สำหรับเงินทุนสนับสนุนการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและพี่ชายที่ให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายต่างๆ ในการทำวิจัยและให้คอยให้กำลังใจเสมอมา ตลอดจนผู้ที่ให้การสนับสนุนท่านอื่นๆที่ไม่ได้เอ่ยนาม ณ ที่นี้ด้วย

นัทรี ฉัตรยาลักษณ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ .....	4
2.1 ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR).....	4
2.1.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ [10].....	5
2.1.2 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ .....	6
2.1.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ [10, 13].....	7
2.1.3.1 ความยืดหยุ่น.....	7
2.1.3.2 ความทนทานต่อการฉีกขาด .....	7
2.1.3.3 ความทนทานต่อแรงดึง.....	8
2.1.4 น้ำยางข้น (concentrated latex).....	8
2.1.5 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (epoxidized natural rubber; ENR) [14].....	8

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมยาง .....	9
2.2.1 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two roll mill) [16] .....	9
2.2.2 เครื่องผสมภายในแบบปิด (internal mixer).....	9
2.3 ปฏิกริยาวัลคาไนเซชัน (vulcanization) [16].....	10
2.4 สารเคมีสำหรับยาง (additives for rubber) [17, 18] .....	10
2.4.1 สารตัวเติม (filler).....	11
2.4.2 กำมะถัน (sulphur, S <sub>8</sub> ).....	11
2.4.3 สารเร่งปฏิกริยาวัลคาไนซ์ (accelerator).....	12
2.4.4 สารกระตุ้นปฏิกริยาวัลคาไนซ์ (activator).....	12
2.5 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง (rubber manufacturing process).....	12
2.5.1 การบดยางให้นุ่ม (mastication).....	13
2.5.2 การผสมเคมียาง (mixing) [19].....	13
2.5.3 การขึ้นรูปและคงรูปร่าง (rubber forming and vulcanization).....	13
2.6 แป้ง (starch).....	14
2.6.1 โครงสร้างของแป้ง [20].....	14
2.6.2 การเกิดเจลาตินไนเซชัน (gelatinization) ของแป้ง [21].....	14
2.7 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง.....	15
2.8 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend).....	16
2.8.1 มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) [26].....	16
2.8.2 สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) [28].....	17
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	23
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	27
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ .....	28



3.3	วิธีการทดลอง.....	29
3.3.1	การเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.....	29
3.3.1.1	การเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีและ ไม่มีกลีเซอรอลด้วย กระบวนการ latex mixing.....	29
3.3.1.2	การเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีและ ไม่มีกลีเซอรอลด้วย กระบวนการ dry mixing.....	31
3.3.1.3	การเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมสารคู่ควบ ไสเลน Si-69 ด้วยกระบวนการ dry mixing.....	32
3.3.2	การวิเคราะห์และขึ้นรูป.....	34
3.3.2.1	การวิเคราะห์ลักษณะการคงรูปของยาง หาเวลา cure time.....	34
3.3.2.2	การเตรียมและการขึ้นรูปชิ้นงานโดยกระบวนการอัดขึ้นรูป.....	35
3.3.3	การทดสอบสมบัติต่างๆ.....	36
3.3.3.1	การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	36
3.3.3.2	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของชิ้นงานด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี.....	39
3.3.3.3	สมบัติทางความร้อน.....	40
3.3.3.4	ความสามารถในการดูดซับน้ำ.....	41
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	42
4.1	แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing.....	42
4.1.1	สมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิค การผสม แบบ latex mixing.....	42
4.1.2	ลักษณะการคงรูปของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิค การผสม แบบ latex mixing.....	44
4.1.3	สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิค การผสม แบบ latex mixing.....	50

4.1.4 สมบัติความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง จากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing.....	52
4.1.5 สมบัติความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจาก เทคนิคการผสมแบบ latex mixing.....	55
4.1.6 สมบัติความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสม แบบ latex mixing.....	57
4.1.7 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing.....	59
4.1.8 การวิเคราะห์โครงสร้างเคมีแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจาก เทคนิคการผสมแบบ latex mixing.....	62
4.2 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing.....	64
4.2.1 สมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิค การผสมแบบ dry mixing .....	64
4.2.2 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing.....	66
4.2.3 สมบัติความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing .....	69
4.2.4 สมบัติความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจาก เทคนิคการผสมแบบ dry mixing.....	73
4.2.5 สมบัติความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing.....	75
4.2.6 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing.....	77
4.3 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing .....	79
4.3.1 สมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing .....	79

4.3.2 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซลีน Si-69 จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing .....	81
4.3.3 สมบัติความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติม Si-69 จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing.....	83
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	88
บรรณานุกรม.....	90
ภาคผนวก.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	139



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ต้นยางพารา.....	4
รูปที่ 2.2	สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ .....	7
รูปที่ 2.3	ปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบอินซิทูโดยใช้กรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	8
รูปที่ 2.4	โครงสร้างของสายโซ่ยางก่อนและหลังปฏิกิริยาการคงรูปยาง.....	10
รูปที่ 2.5	โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินของแป้ง .....	14
รูปที่ 2.6	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอล .....	16
รูปที่ 2.7	โครงสร้างของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ .....	16
รูปที่ 2.8	โครงสร้างเคมีของสารคู่ควบไซเลน (a) Si-69 และ (b) Si-264.....	17
รูปที่ 2.9	กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับสารคู่ควบไซเลน .....	18
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง จาก กระบวนการผสมแบบ latex mixing .....	24
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง จาก กระบวนการผสมแบบ dry mixing.....	25
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง ที่เติมสารคู่ควบ ไซเลน Si-69 โดยกระบวนการผสมแบบ dry mixing .....	26
รูปที่ 3.4	การเตรียมสารละลายแป้งมันฝรั่ง.....	30
รูปที่ 3.5	การเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล .....	31
รูปที่ 3.6	เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง .....	33
รูปที่ 3.7	เครื่องผสมแบบปิด.....	34
รูปที่ 3.8	เครื่องรีโอมิเตอร์ .....	34
รูปที่ 3.9	ชุดแม่พิมพ์สแตนเลสรูปสี่เหลี่ยมขนาด 170 mm x 170 mm x 1.9 mm.....	35
รูปที่ 3.10	เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด.....	35
รูปที่ 3.11	เครื่องทดสอบความแข็งแบบชอร์เอ .....	36

รูปที่ 3.12 เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบระบบไฮโดรลิก .....	37
รูปที่ 3.13 ลักษณะตัวอย่างชิ้นงานรูปดัมเบลล์สำหรับทดสอบความทนแรงดึง .....	37
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบ universal testing machine รุ่น 5ST .....	38
รูปที่ 3.15 ชิ้นทดสอบแบบ angle สำหรับทดสอบความทนการฉีกขาด .....	39
รูปที่ 3.16 เครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ .....	40
รูปที่ 3.17 เครื่อง thermal gravimetric analyzer (TGA) .....	40
รูปที่ 3.18 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับน้ำ .....	41
รูปที่ 3.19 การทดสอบการดูดซับน้ำของชิ้นงาน .....	41
รูปที่ 4.1 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง (NR/PS) ที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing .....	43
รูปที่ 4.2 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมกลีเซอรอล (NR/PS/Gly10) และเตรียม ด้วยกระบวนการ latex mixing .....	44
รูปที่ 4.3 เวลาก่อนการคงรูปของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียม ด้วยกระบวนการ latex mixing .....	45
รูปที่ 4.4 เวลาในการคงรูปของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียม ด้วยกระบวนการ latex mixing .....	45
รูปที่ 4.5 ค่าแรงบิดต่ำสุดของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียม ด้วยกระบวนการ latex mixing .....	46
รูปที่ 4.6 ค่าแรงบิดสูงสุดของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียม ด้วยกระบวนการ latex mixing .....	46
รูปที่ 4.7 ค่าผลต่างแรงบิดของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียม ด้วยกระบวนการ latex mixing .....	47
รูปที่ 4.8 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียม ด้วยกระบวนการ latex mixing .....	51
รูปที่ 4.9 ค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียม ด้วยกระบวนการ latex mixing .....	52

รูปที่ 4.10 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing .....	53
รูปที่ 4.11 สมบัติความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing .....	56
รูปที่ 4.12 สมบัติความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing .....	58
รูปที่ 4.13 วิเคราะห์โครงสร้างเคมีด้วยเทคนิค ATR- FTIR ของ NR, PS, NR/PS, PS/Gly10 และ NR/PS/Gly10 .....	62
รูปที่ 4.14 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง (NR/PS) ที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing .....	65
รูปที่ 4.15 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมกลีเซอรอล (NR/PS/Gly10) ที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing .....	66
รูปที่ 4.16 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียม .....	67
รูปที่ 4.17 อิทธิพลของกระบวนการเตรียมต่อค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ ผสมแป้งมันฝรั่ง ก) ไม่เติมกลีเซอรอล ข) เติมกลีเซอรอล .....	68
รูปที่ 4.18 ค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing .....	69
รูปที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing .....	70
รูปที่ 4.20 อิทธิพลของกระบวนการเตรียมต่อค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง ก) ไม่เติมกลีเซอรอล ข) เติมกลีเซอรอล .....	72
รูปที่ 4.21 อิทธิพลของกระบวนการเตรียมต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง ก) ไม่เติมกลีเซอรอล ข) เติมกลีเซอรอล .....	72
รูปที่ 4.22 สมบัติความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing .....	73
รูปที่ 4.23 อิทธิพลของกระบวนการเตรียมต่อค่าความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง ก) ไม่เติมกลีเซอรอล ข) เติมกลีเซอรอล .....	75

รูปที่ 4.24 สมบัติความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียม ด้วยกระบวนการ dry mixing .....	76
รูปที่ 4.25 อิทธิพลของกระบวนการเตรียมต่อค่าความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง ก) ไม่เติมกลีเซอรอล ข) เติมกลีเซอรอล .....	77
รูปที่ 4.26 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน (NR/PS/Si69) จากการเตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing .....	80
รูปที่ 4.27 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารคู่ควบไซเลน .....	80
รูปที่ 4.28 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 เทียบกับทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล จากการเตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing .....	82
รูปที่ 4.29 ค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 เทียบกับทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล จากการเตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing .....	84
รูปที่ 4.30 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง ที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 เทียบกับทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล จากการเตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing .....	84
รูปที่ 4.31 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 เทียบกับทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล จากการเตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing .....	86

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ข้อมูลผลผลิตยางพาราในประเทศไทยระหว่างปี 2560 – 2562.....	5
ตารางที่ 2.2	องค์ประกอบในน้ำยางธรรมชาติ .....	6
ตารางที่ 2.3	คุณสมบัติในการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งแต่ละชนิด ที่ 95 องศาเซลเซียส.....	15
ตารางที่ 3.1	วัตถุดิบและสารเคมี.....	27
ตารางที่ 3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	28
ตารางที่ 3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ .....	29
ตารางที่ 3.4	สูตรคอมพาว์น .....	33
ตารางที่ 4.1	สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วย กระบวนการ latex mixing.....	51
ตารางที่ 4.2	สมบัติความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วย กระบวนการ latex mixing.....	53
ตารางที่ 4.3	สมบัติความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจาก เทคนิค การผสมแบบ latex mixing.....	57
ตารางที่ 4.4	สมบัติความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing.....	59
ตารางที่ 4.5	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจาก เทคนิค นิกการผสมแบบ latex mixing.....	61
ตารางที่ 4.6	โครงสร้างทางเคมีของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ แผ่นฟิล์มแป้งมันฝรั่ง และแผ่นฟิล์มยาง ธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล ด้วยเทคนิค ATR-FTIR.....	63
ตารางที่ 4.7	สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วย กระบวนการ dry mixing.....	68
ตารางที่ 4.8	สมบัติความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วย กระบวนการ dry mixing.....	70



ตารางที่ 4.9	แสดงค่าความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์ม NR/PS โดยเทคนิค dry mixing .....	74
ตารางที่ 4.10	สมบัติความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing .....	76
ตารางที่ 4.11	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing .....	78
ตารางที่ 4.12	สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมไซเลนที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing .....	81
ตารางที่ 4.13	สมบัติความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 จากกระบวนการผสมแบบ dry mixing .....	83
ตารางที่ 4.14	สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 จากกระบวนการผสมแบบ dry mixing .....	85



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการใช้ผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์เพื่ออำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันในปริมาณที่มากขึ้น โดยเฉพาะกลุ่มบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งมีระยะเวลาใช้งานที่สั้น ส่งผลให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกและการกำจัด เนื่องจากพอลิเมอร์มีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ความชื้นและสารเคมีได้เป็นอย่างดี จึงส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ หากจะทำการกำจัดโดยการเผาขยะพอลิเมอร์ก็จะทำให้เกิดก๊าซพิษซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพภาวะทางอากาศ จึงทำให้เกิดการสะสมของขยะพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้หากพิจารณาในส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตพอลิเมอร์ซึ่งก็คือ ปิโตรเคมีที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งมีปริมาณลดลงอย่างมาก ในขณะที่อัตราการเกิดขึ้นทดแทนนั้นช้ามาก ทำให้ราคาของปิโตรเคมีเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้ราคาพอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน เพื่อลดการพึ่งพาผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม จึงมีนักวิจัยจำนวนมากสนใจที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่างๆ จากการใช้พอลิเมอร์จากธรรมชาติ ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยนำพอลิเมอร์จากธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้นเพื่อเพิ่มมูลค่าให้ผลผลิตทางการเกษตร

ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) เป็นพอลิเมอร์จากแหล่งทรัพยากรธรรมชาติและเป็นที่แพร่หลายที่สำคัญของประเทศไทยที่มีอยู่จำนวนมากประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกยางธรรมชาติเป็นอันดับต้นๆ ของโลก ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น ความยืดหยุ่น (elasticity) [1], ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และความทนแรงฉีกขาด (tear strength) สูง เป็นต้น ด้วยคุณสมบัติเด่นเหล่านี้ทำให้สามารถนำยางธรรมชาติมาผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิด เช่น ยางล้อ ถุงมือยาง ลูกโป่ง ยางรัดของ อุปกรณ์ทางการแพทย์ ฯลฯ ในขณะที่ข้อด้อยของยางธรรมชาติคือ ดูดซึมน้ำได้น้อย เสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับแสงแดด ความร้อน ออกซิเจนและโอโซน เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง ทำให้มีขอบเขตการใช้งานที่จำกัด [2] จึงทำให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติให้อยู่ในรูปแบบพอลิเมอร์ผสมออกมาเป็นจำนวนมาก โดยชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมก็จะต่างกันไป ขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการปรับปรุง

แป้งมันฝรั่งเป็นวัตถุดิบตามธรรมชาติที่มีอยู่จำนวนมาก มีราคาถูกหาได้ทั่วไป สามารถสร้างขึ้นมาทดแทนได้ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [3, 4] และสามารถดูดซับน้ำได้ดี [5] เนื่องจากในโครงสร้างของแป้งมันฝรั่งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เป็นจำนวนมาก จึงมีผู้สนใจนำมาใช้ประโยชน์มากมาย เช่น แผ่นฟิล์มคลุมดิน ด้านการแพทย์ได้นำมาผลิตเป็นวัสดุปิดแผล [6] ผลิตคอนแทคเลนส์ใช้เป็นวัสดุนำส่งยา [7] ด้านการเกษตรใช้เตรียมไฮโดรเจลกักเก็บความชื้นให้พืช เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แป้งมันฝรั่งมีข้อด้อยคือ แข็งเปราะ (brittle) และขึ้นรูปยาก

งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ที่จะพัฒนาแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งเพื่อใช้เป็นแผ่นฟิล์มสำหรับเกษตรกรรมสำหรับปลูกดินหรือคลุมหน้าดิน ซึ่งแผ่นฟิล์มดังกล่าวควรมีสมบัติเชิงกลที่ดีและสามารถดูดซับน้ำได้ โดยจะทำการศึกษาถึงกระบวนการเตรียมที่เหมาะสม อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและแป้งมันฝรั่งและการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ กลีเซอรอลและสารคู่ควบไซเลน Si-69 ต่อสมบัติการดูดซับน้ำ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของปริมาณแป้งมันฝรั่งต่อสมบัติการดูดซับน้ำ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง
2. เพื่อเปรียบเทียบสมบัติการดูดซับน้ำ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing กับที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing
3. เพื่อศึกษาผลของการเติมกลีเซอรอลเทียบกับการใช้สารคู่ควบไซเลน Si-69 ต่อสมบัติการดูดซับน้ำ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลด้วยกระบวนการเตรียมแบบ latex mixing และ dry mixing
2. ทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมได้ทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลหรือสารคู่ควบไซเลน Si-69

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์จากยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งสำหรับใช้เป็นผลิตภัณฑ์ปูรองดินหรือคลุมหน้าดิน



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR)

ยางธรรมชาติคือ พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ได้จากต้นยางพาราซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า “ฮีเวียบราซิลเลียนซิส” (Hevea Brasiliensis) เป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยในอดีตมีศูนย์กลางการปลูกและซื้อขายอยู่ที่เมืองท่าบราซิลฝั่งแม่น้ำอะเมซอน ชื่อเมืองพารา ประเทศบราซิล ทำให้เรียกชื่อต่อๆ กันมาว่า ยางพารา โดยยางพาราจัดเป็นหนึ่งในพืชที่มีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมในประเทศไทย จัดเป็นพืชเศรษฐกิจอันดับสองของประเทศรองจากข้าว ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติเป็นอันดับหนึ่งของโลก



รูปที่ 2.1 ต้นยางพารา [8]

จากข้อมูลผลผลิตยางพาราในประเทศไทยระหว่างปี 2560 – 2562 พบว่า ผลผลิตต่อไร่สูงขึ้นในแต่ละปีแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลผลผลิตยางพาราในประเทศไทยระหว่างปี 2560 – 2562 [9]

ปี	เนื้อที่กรี๊ดได้ (ไร่)	ผลผลิต (ตัน)	ผลผลิตต่อไร่ (กิโลกรัม)
2560	19,040,711	4,502,804	236
2561	19,973,345	4,844,950	243
2562	20,396,227	5,023,877	246
%	2.12	3.69	1.23

### 2.1.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ [10]

น้ำยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวหรือสีขาวขุ่นคล้ายน้ำนม มีสภาพเป็นคอลลอยด์ (colloid dispersion) หรือสารแขวนลอย (suspension) ประกอบไปด้วย 30-40% ของยางแห้ง และ 5-10% เป็นโปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และสารอินทรีย์อื่นๆ มีความหนาแน่น 0.975-0.980 กรัม/มิลลิลิตร มีความเป็นกรดต่าง (pH) ประมาณ 6.5-7.0 อนุภาคในน้ำยางแขวนลอยหรือกระจายอยู่ในซีรัม (serum) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 5 ไมครอน และมีประจุลบซึ่งผลักกันตลอดเวลาจึงทำให้อนุภาคเหล่านี้สามารถแขวนลอย และคงสภาพเป็นยางเหลวอยู่ได้นาน ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 2.2 โดยน้ำยางธรรมชาติมีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

ส่วนเนื้อยาง (rubber phase) คิดเป็น 30-36% โดยอนุภาคยางธรรมชาติจะมีขนาด 0.05-3 ไมครอน ที่ผิวของอนุภาคยางจะถูกล้อมด้วยชั้นของโปรตีนและไขมันซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ จะทำให้อนุภาคของยางสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างเสถียร ป้องกันไม่ให้แต่ละอนุภาคยางมารวมตัวกันเป็นก้อนยางแข็งตกตะกอนที่เรียกว่า โคแอกคูลัม (coagulum) แรงผลักดันของอนุภาคยางซึ่งกันและกัน ทำให้น้ำยางธรรมชาติเคลื่อนที่ไปมาแบบไร้ทิศทาง (Brownian movement) อยู่เสมอ และจะหยุดเคลื่อนที่เมื่อมีประจุไฟฟ้ารวมของน้ำยางเป็นศูนย์ (isoelectric point) จับกันเป็นก้อนได้ [11, 12]

ส่วนชั้นน้ำหรือซีรัม (serum phase) คิดเป็น 44-55% ในส่วนของชั้นน้ำนี้จะประกอบไปด้วยสารที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโน โปรตีนบางชนิด คาร์โบไฮเดรต เอนไซม์ และไอออนของโลหะ เป็นต้น

ส่วนตกตะกอน (bottom phase) คิดส่วนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าส่วนอื่นๆ คิดเป็น 15-20% เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในส่วนนี้คือ อนุภาคลูทอยด์ (lutoid particle) ซึ่งลูทอยด์นี้มีลักษณะเป็นทรงกลมโดยมีชั้นของเยื่อหุ้มปกคลุมอนุภาคอยู่ เยื่อหุ้มนี้ไวต่อการแพร่ผ่าน (osmotic sensitivity membrane) ซึ่งจะเสียความเสถียรได้ง่าย ภายในอนุภาคของลูทอยด์จะประกอบไปด้วย สารจำพวกโปรตีน คาร์โบไฮเดรต กรด และเกลือต่างๆ ในส่วนของตะกอนนี้มีค่าความเป็นด่างอยู่ที่ 5.5 ดังนั้นในน้ำยางที่ไม่ถูกกำจัดเอาลูทอยด์ออก มักเกิดจากการจับตัวกันเองตามธรรมชาติ

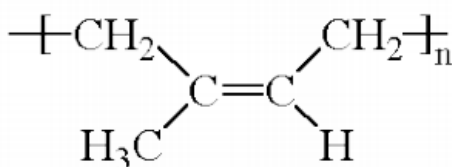
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบในน้ำยางธรรมชาติ [10]

องค์ประกอบ	ปริมาณโดยน้ำหนัก (%)
เนื้อยางแห้ง (dry rubber content, DRC)	36
โปรตีนและกรดอะมิโน	1.4
ไขมัน	1.6
คาร์โบไฮเดรต	1.6
สารอินทรีย์	0.5
อื่นๆ	0.4
น้ำ	58.5

### 2.1.2 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน ( $C_5H_8$ , *cis*-1,4 polyisoprene) และมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.2 โดยโครงสร้างหลักของยางธรรมชาติจะประกอบไปด้วยไอโซพรีนที่มีโครงสร้างแบบซิส (*cis*-isoprene) เป็นส่วนใหญ่ ยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน แต่ทนต่อของเหลวที่มีขั้ว โดยทั่วไปแล้วโมเลกุลยางธรรมชาติจะจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบหรือแบบอสัณฐาน (amorphous) เมื่อได้รับแรงดึงจะเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้เกิดผลึกในขณะที่ได้รับแรงดึง (strain-induced crystallization) ผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น [10] ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000-400,000 มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้างมากและมีความ

หนาแน่น 0.93 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสและมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน ( $T_g$ ) ประมาณ -72 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ [10]

### 2.1.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ [10, 13]

ยางธรรมชาติมีสมบัติโดดเด่นในเรื่องความยืดหยุ่น (elasticity) ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อแรงฉีกขาด (tear strength) ความเหนียวติดกัน (tack) เป็นต้น สมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ ได้แก่

#### 2.1.3.1 ความยืดหยุ่น

ความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นของยางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งเมื่อมีแรงภายนอกมากจะทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่าง เมื่อแรงนั้นหมดไปยางธรรมชาติจะคืนกลับสู่รูปร่างที่มีขนาดเดิมหรือใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง

#### 2.1.3.2 ความทนทานต่อการฉีกขาด

ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดได้สูง เนื่องจากมีความสามารถในการเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึง (strain-induced crystallization) โดยผลึกที่เกิดขึ้นนี้จะมีการเรียงตัวในแนวเดียวกับแรงดึงและตั้งฉากกับรอยฉีกขาดทำให้เกิดการขัดขวางการฉีกขาดที่เกิดขึ้น และการเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยให้ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้นได้อีก



### 2.1.3.3 ความทนทานต่อแรงดึง

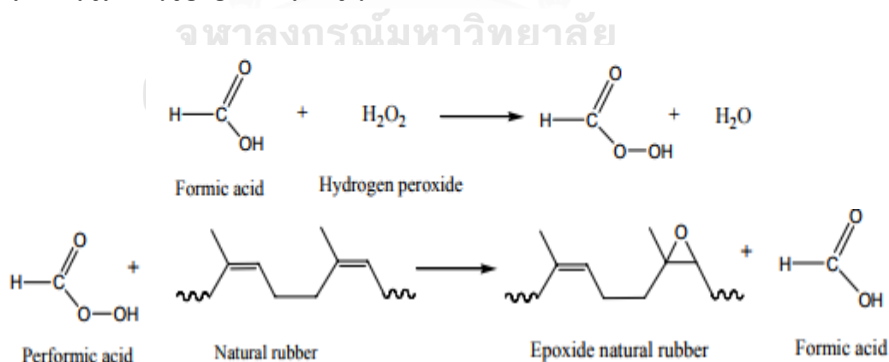
ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงสูง เนื่องจากเมื่อได้รับแรงดึงจะยืดออกและโมเลกุลจะเรียงตัวเป็นระเบียบสูงสามารถพลิกได้ง่าย ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นช่วยให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงที่สูงทั้งก่อนและหลังการทำให้คงรูป

### 2.1.4 น้ำยางข้น (concentrated latex)

น้ำยางข้น หมายถึง น้ำยางที่ได้ผ่านกระบวนการกำจัดน้ำออกไปบางส่วน เพื่อให้มีเนื้อยางเพิ่มขึ้นเป็น 60% ของน้ำหนักน้ำยาง ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่มีความเหมาะสมกับการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อให้ง่ายต่อการเก็บรักษาและขนส่ง อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่ใช้น้ำยางข้นเป็นวัตถุดิบจะมีเสถียรภาพมากขึ้น

### 2.1.5 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (epoxidized natural rubber; ENR) [14]

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ คือยางที่ดัดแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติโดยการเติมออกซิเจน ลงไปในโครงสร้างของยางธรรมชาติบริเวณตำแหน่งพันธะคู่เพื่อให้เกิดหมู่อีพอกไซด์ (epoxide group) หรือวงแหวนออกซิเรน (oxirane ring) แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยใช้สารเคมีจำพวกกรดเปอร์ออกซี (peroxy acid) โดยมีการผลิตขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น เช่น สามารถทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายไม่มีขั้วได้ดีขึ้น สามารถทนต่อโอโซน มีความแข็งเพิ่มขึ้น ทนต่อการสึกกร่อนสูงขึ้น สามารถทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดีขึ้น สามารถทนต่อโอโซนและการซึมผ่านของอากาศได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.3 ปฏิกริยาอีพอกซิเดชันแบบอินซิทูโดยใช้กรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [15]

## 2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมยาง

เครื่องมือในการผสมมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยเบื้องต้นสามารถแบ่งออกได้เป็น เครื่องผสมแบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง และเครื่องผสมแบบปิด โดยรายละเอียดของเครื่องมือมีดังนี้

### 2.2.1 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two roll mill) [16]

เครื่องบดผสมระบบเปิดนี้เป็นแบบ 2 ลูกกลิ้งเรียงตัวในแนวขนานกัน หมุนเข้าหากัน ด้วยความเร็วที่ต่างกันทำให้เกิดแรงเฉือนที่จำเป็นต่อการบดผสมยางกับสารเคมี ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูกบีบอัดและบดยางให้โมเลกุลของยางขาด ส่งผลให้ขนาดของโมเลกุลยางที่ใหญ่เล็กลง และทำให้สารเคมีผสมเข้าไปในเนื้อยางได้ง่าย การลดความหนืดของยางก่อนการเติมสารเคมีลงไป โดยกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า กระบวนการบดย่อย (mastication) ซึ่งการที่จะทำใหยางนิ่มลงนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเร็วของผิวลูกกลิ้งทั้งสอง โดยที่ลูกกลิ้งหน้าจะหมุนช้ากว่าลูกกลิ้งหลัง อัตราส่วนความเร็วระหว่างลูกกลิ้งหน้ากับลูกกลิ้งหลัง เรียกว่า friction ratio อุณหภูมิของลูกกลิ้งก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการทำ mastication เช่นกัน กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิต่ำยางจะมีความหนืดสูง ส่งผลทำให้มีแรงเฉือนสูง การฉีกขาดของสายโซ่โมเลกุลยางก็จะสูงขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงยางจะนิ่มลงเนื่องจากถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย เมื่อยางผ่านช่องระหว่างลูกกลิ้ง 3-4 ครั้ง ยางขึ้นเล็กๆ จะเริ่มเกาะติดกันเป็นชั้นเดียวและสามารถจับพันรอบลูกกลิ้งได้ ในการผสมนั้น ยางกับสารเคมีจะถูกใส่ลงในช่องระหว่างลูกกลิ้ง จากนั้นจึงเติมสารเคมีลงไปในยาง ยางที่ถูกพับจะถูกใส่กลับเข้าไปในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งอีกครั้ง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะช่วยให้สารเคมีต่างๆ กระจายเข้ากับเนื้อยางได้ดีและกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอทั้งเนื้อยาง (distributive mixing) เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้งนี้ใช้ผสมยางในปริมาณไม่มากนัก

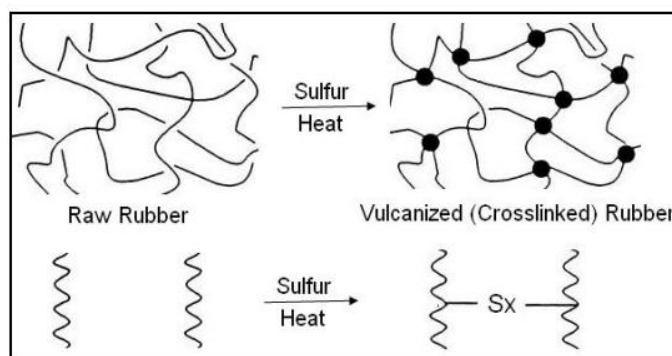
### 2.2.2 เครื่องผสมภายในแบบปิด (internal mixer)

เครื่องผสมชนิดนี้มีโรเตอร์ 1 คู่ หมุนเข้าหากันอยู่ในห้องผสม โดยทั้งห้องผสมและโรเตอร์สามารถหล่อน้ำร้อนหรือน้ำหรือหล่อน้ำเย็นได้ ยางและสารเคมีถูกป้อนเข้าทางด้านบน ปิดเครื่องด้วยฝาปิด (ram) ที่อัดส่วนผสมภายใน ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมแรงเฉือนจะเกิดขึ้นที่บริเวณช่องว่างปีกของโรเตอร์ ลักษณะของโรเตอร์ไม่ราบเรียบ ทำให้ขณะการหมุนเกิดแรงเฉือนภายในห้องผสมสูงมาก ทำใหยางและสารเคมีจะถูกบีบขนาดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อผสมเสร็จแล้วจึงเปิดฝา (door) แล้วจึงนำยางออกมา จุดเด่นสำคัญที่สุดของเครื่องผสมยางแบบปิด คือสารตัวเติมสามารถแตกตัวและกระจายในยางได้ดี สามารถทำใหยางผสมเข้าในยางได้จำนวนมากและใช้เวลาน้อยที่สุด

สามารถควบคุมอุณหภูมิห้องผสมและโรเตอร์ได้ดีกว่าจึงมีประสิทธิภาพการผสมที่สูงกว่าการใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง อีกทั้งสารเคมีไม่ฟุ้งกระจายระหว่างการผสม ลดการสูญเสียสารเคมีขณะผสม และลดการผิดพลาดเนื่องจากการใช้แรงงานคนในการผสม

### 2.3 ปฏิกริยาวัลคาไนเซชัน (vulcanization) [16]

ปฏิกริยาการคงรูปร่างหรือปฏิกริยาวัลคาไนเซชัน หมายถึง กระบวนการเปลี่ยนสภาพยางที่ไม่คงตัวให้เป็นยางที่มีสภาพคงตัว เนื่องจากโครงสร้างของโมเลกุลเกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล และสามารถรักษารูปร่างเดิมได้หลังจากที่มีแรงกระทำด้วยการให้ความร้อนขณะขึ้นรูปร่าง โดยโครงสร้างของสายโซ่ยางก่อนและหลังปฏิกริยาการคงรูปร่างแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสายโซ่ยางก่อนและหลังปฏิกริยาการคงรูปร่าง [9]

### 2.4 สารเคมีสำหรับยาง (additives for rubber) [17, 18]

สารเคมีสำหรับยาง หมายถึง สารเคมีต่างๆ ที่ผสมลงไปนยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติที่ดี โดยสารเคมีสำหรับยางกลุ่มที่เกี่ยวข้องกับการคงรูปร่างจะมีการทำปฏิกริยากับยาง ซึ่งการให้สารเคมีเหล่านี้เข้าทำปฏิกริยากับยางสามารถเร่งได้ด้วยการให้ความร้อน โดยยางที่ยังไม่เกิดปฏิกริยากับสารเคมีจะเรียกว่า ยางไม่คงรูป (green compound หรือ uncured compound) ส่วนยางที่ทำปฏิกริยาคงรูปแล้วจะเรียกว่า ยางคงรูป (vulcanized rubber หรือ cured rubber) สารเคมีสำหรับยางที่สำคัญที่มีการเติมลงในผลิตภัณฑ์ยางมีดังนี้

### 2.4.1 สารตัวเติม (filler)

สารตัวเติม หมายถึงสารที่เติมลงไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เพื่อเปลี่ยน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของยาง เพื่อเสริมแรงให้ยางมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นหรือช่วยลดต้นทุนการผลิต เพื่อให้ยางคอมพาว์นมีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต เพื่อลดการพองตัวของยางในน้ำมัน เพิ่มการนำไฟฟ้าหรือเพิ่มอายุการใช้งานของยาง เป็นต้น ซึ่งสารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ตามประสิทธิภาพการเสริมแรง คือ สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing fillers) ซึ่งจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) ได้แก่ ผงเขม่าดำ (carbon black) เกรดต่างๆ และผงเขม่าขาว หรือ ซิลิกา เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงหรือเรียกว่าสารตัวเติมเฉื่อย (non-reinforcing fillers หรือ inert fillers) นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (clay) แป้ง แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

### 2.4.2 กำมะถัน (sulphur, S<sub>8</sub>)

ตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ยางเป็นวัสดุที่ต้องทำการคงรูปก่อนถึงจะสามารถนำไปใช้งานได้ โดยปฏิกิริยาการคงรูปทำให้โครงสร้างโมเลกุลเกิดการเชื่อมขวางจนได้เป็นโครงสร้างแบบตาข่าย 3 มิติ (3-D network) เปลี่ยนยางที่อยู่ในสภาพไม่คงตัวให้เป็นอย่างที่มีรูปทรงได้อีกทั้งมีลักษณะยืดหยุ่นด้วย สำหรับยางที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่อิ่มตัว (unsaturation) ซึ่งรวมไปถึงยางธรรมชาตินั้น สารคงรูปหรือสารวัลคาไนซ์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดได้แก่ กำมะถัน ทั้งนี้เนื่องมาจากเป็นระบบที่มีราคาถูก สามารถปรับเวลาในการคงรูปให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตได้ง่าย อีกทั้งยางคงรูปที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่ายางคงรูปที่ได้จากการคงรูปแบบอื่น กำมะถันที่ดีต้องเป็นชนิดที่มีความบริสุทธิ์สูง เนื้อละเอียดขนาดอนุภาคเล็ก การคงรูปจะเกิดขึ้นเมื่อให้ความร้อนกับยางคอมพาว์น อย่างไรก็ตาม ระบบการคงรูปยางด้วยกำมะถันจำเป็นต้องเติมสารเคมีอื่นเพื่อช่วยให้การคงรูปเกิดขึ้นในเวลาอันสั้นได้ ซึ่งได้แก่ สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) และสารกระตุ้น (activator)

### 2.4.3 สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (accelerator)

การคงรูปยางธรรมชาติโดยใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียวต้องใช้กำมะถันในปริมาณมาก และใช้เวลานานที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้ามากหลายชั่วโมง ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลต่ำ สืดล้าและเมื่อทิ้งไว้จะเกิดการซึมของกำมะถันออกมาที่ผิวเนื่องจากกำมะถันจะเชื่อมต่อกันเองเป็นสายยาว หรือ อยู่ในรูปของกำมะถันอิสระ (free sulphur) ทำให้จำเป็นต้องเติมสารเคมีที่เพิ่มประสิทธิภาพในการคงรูปให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งสารเคมีดังกล่าวจะเรียกว่า สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป ซึ่งสารนี้จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอยิ่งขึ้นและลดปริมาณการใช้กำมะถันลง ทำให้สามารถลดการซึมของกำมะถันออกมาบนผิว ยางคงรูปที่ได้จะมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปที่ดี จะสามารถทำให้ยางคงรูปได้เร็ว มีความว่องไวในการเร่งให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางสูง ละลายได้ดีในยาง มีความปลอดภัยในกระบวนการผลิต สามารถเก็บรักษาได้นานโดยไม่เสื่อม ใช้งานได้ที่ช่วงอุณหภูมิกว้างและเข้ากันได้ดีกับสารเคมีอื่นๆ ที่ใส่เข้าไปในยาง

### 2.4.4 สารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (activator)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการคงรูป โดยสารกลุ่มนี้จะเข้าไปกระตุ้นสารตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่มากขึ้น ทำให้มีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปสูงขึ้น นอกจากนี้สารกระตุ้นยังช่วยไม่ให้อายุของยางเสื่อมสภาพเร็วเกินไป โดยจะไปนิยมนำมาใช้ร่วมกับออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) ร่วมกับกรดสเตียริก (stearic acid, SA) เพราะเมื่อสารเคมีทั้งสองทำปฏิกิริยากันจะเกิดเป็นซิงก์สเตียเรตที่สามารถละลายในยางได้ง่าย บางครั้งถ้าไม่มีการเติมสารกระตุ้นอาจทำให้ไม่มีการคงรูปหรือการวัลคาไนซ์เกิดขึ้น ดังนั้นสารกระตุ้นจึงจำเป็นในการทำให้อายุการใช้งานของยางคงรูปได้อย่างสมบูรณ์

## 2.5 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง (rubber manufacturing process)

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ คือ การบดยางให้นิ่ม การผสมยางกับสารเคมี (mixing) การขึ้นรูปยาง และคงรูปยาง โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

### 2.5.1 การบดยางให้ نرم (mastication)

การบดยางให้ نرم คือ การที่ทำให้ยางซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดการฉีกขาดของสายโมเลกุลและเกิดเรดิคัล (radical) ที่ปลายสายโมเลกุลที่ขาดออก ทำให้น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของยางธรรมชาติลดลงก่อนที่จะเติมสารเคมีอื่นๆ ลงไป ช่วยทำให้สารเคมีที่เติมลงไปนั้นผสมเข้าไปรวมกับเนื้อยางได้ง่ายขึ้น

### 2.5.2 การผสมเคมียาง (mixing) [19]

ขั้นตอนการบดผสมให้ มีประสิทธิภาพและมีความสม่ำเสมอในคุณภาพนั้น ควรจะมีลำดับขั้นตอนการเติมสารเคมีต่างๆ ให้เป็นไปตามขั้นตอนอย่างถูกต้องโดยควรเติมสารที่กระจายตัวในตัวกลางได้ยากก่อนลงบนกองยางบนช่องระหว่างลูกกลิ้ง เช่น ซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก ผงเขม่าดำ เนื่องจากอนุภาคในการบดยังต่ำ และอีกทั้งยังมีความหนืดสูง แรงกระทำเชิงกลจึงมีมาก จากนั้นจึงเติมสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง สารอื่นๆ และน้ำมัน สารที่ควรเติมลำดับสุดท้าย คือ สารตัวเร่งกำมะถัน และสารป้องกันยางตาย (scorch) เมื่อลูกกลิ้งหมุนไปยางก็จะค่อยๆ ดึงสารเคมีติดลงไปบดผสมกัน โดยในขณะที่ผสมจะทำการตัดยางบนลูกกลิ้งและเพื่อจะทำให้การบดผสมมีความสม่ำเสมอจะต้องจับเวลาในการบดและควรตรวจสอบอุณหภูมิของผิวหน้าลูกกลิ้งตลอดการผสม ยางที่ได้หลังจากที่ผสมสารเคมีต่างๆ เรียบร้อยแล้ว เรียกว่า ยางคอมพาวด์

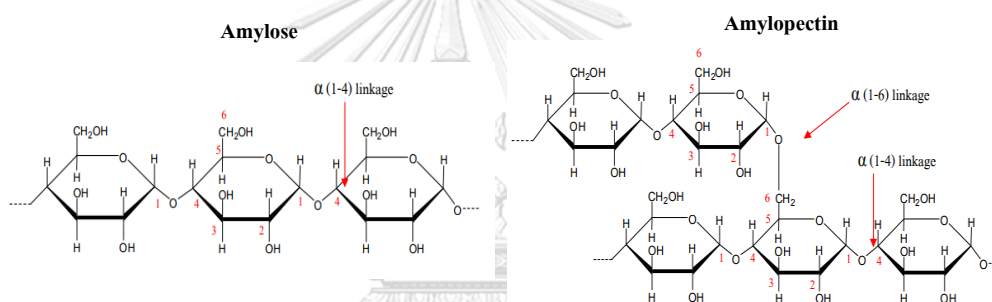
### 2.5.3 การขึ้นรูปและคงรูปยาง (rubber forming and vulcanization)

การขึ้นรูปและการทำให้ยางคงรูปเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง โดยการคงรูปยางนั้นเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนจากยางดิบ (raw rubber) ไปเป็นยางสุกหรือยางคงรูปด้วยความร้อน เนื่องจากยางดิบมีความยืดหยุ่นต่ำ ไหลได้ง่าย อีกทั้งยังไม่มีเสถียรภาพทางรูปร่าง มีขีดจำกัดด้านการใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแปรรูปยางดิบให้เป็นยางสุกที่ไม่สามารถไหลได้อีก ยางคงรูปที่ได้จึงมีความยืดหยุ่นและเสถียรภาพสูงขึ้นหรือเก็บไว้เพื่อใช้งานได้นาน นอกจากนี้ยังสะดวกต่อการขนส่งและการจัดเก็บ สิ่งที่สำคัญในขั้นตอนนี้ก็คือ จะต้องทำการขึ้นรูปยางให้เสร็จเรียบร้อยก่อนที่กระบวนการคงรูปจะเกิดขึ้น

## 2.6 แป้ง (starch)

### 2.6.1 โครงสร้างของแป้ง [20]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่พบในคลอโรพลาสต์และแหล่งเก็บอาหารของพืช เช่น เมล็ด หัวและราก โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยมีสูตรเคมีทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  ประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ 2 ชนิด ได้แก่ อะไมโลส (amylose) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น พันธะที่เชื่อมระหว่างวงแหวนเป็นแบบอัลฟา  $\alpha$ -1,4-glycosidic linkage และอะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง โดยส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย  $\alpha$ -1,4-glycosidic linkage ส่วนที่เป็นกิ่งเชื่อมต่อกันด้วย  $\alpha$ -1,6-glycosidic linkage ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้ง [20]

### 2.6.2 การเกิดเจลลิตินในเซชัน (gelatinization) ของแป้ง [21]

เจลลิตินในเซชัน เป็นกระบวนการที่แสดงถึงการพองตัว (swelling) โดยน้ำจะซึมเข้าสู่เม็ดแป้งและจับกับหมู่ไฮดรอกซิลภายในเม็ดแป้งเกิดการพองตัวและดูดซับน้ำ (hydration) เมื่อให้ความร้อนแก่น้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส พันธะไฮโดรเจนของแป้งจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำ โมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลงเกิดการพองตัวเคลื่อนไหวได้ยากจนมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น ช่วงอุณหภูมิที่แป้งมีการดูดน้ำอย่างรวดเร็วและการพองตัวมากเรียกช่วงอุณหภูมินี้ว่า gelatinization temperature โดยแป้งจากส่วนหัว เช่น แป้งมันฝรั่ง (potato starch) มีการพองตัวสูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.3 เนื่องจากแป้งมันฝรั่งมีปริมาณอะไมโลเพกตินมากกว่าอะไมโลสและแรงผลักระหว่างหมู่ฟอสเฟตที่อยู่บนอะไมโลเพกติน ทำให้พันธะในส่วนที่เป็นผลึกอ่อนแอลง จึงเกิดการพองตัวและดูดซับน้ำได้ ทำให้มีสมบัติการพองตัวสูง [22] มากกว่าแป้งชนิดอื่น

**ตารางที่ 2.3** คุณสมบัติในการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งแต่ละชนิด  
ที่ 95 องศาเซลเซียส

แป้ง	กำลังการพองตัว	การละลาย (%)
มันฝรั่ง	>1000	82
มันสำปะหลัง	71	48
พุทธรักษา	72	37
ท้าวยายม่อม	54	28
มันเทศ	46	18
ข้าวโพด	24	25
ข้าวฟ่าง	22	22

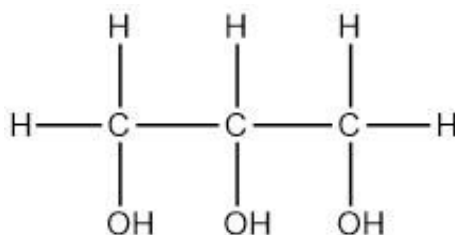
ที่มา : Leach และคณะ, 1959

## 2.7 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง

เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างโมเลกุลของแป้ง แป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) อยู่ 3 หมู่ ซึ่งเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลข้างเคียงได้ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงมาก ดังนั้นการจะสลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจึงต้องใช้พลังงานที่สูงกว่าพลังงานที่ใช้ทำลายพันธะในสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ เมื่อมีการให้ความร้อนแป้งมากขึ้นเรื่อยๆ แทนที่จะทำให้โมเลกุลของแป้งสามารถเคลื่อนผ่านกันได้แต่กลับทำให้โมเลกุลของแป้งเกิดการสลายตัว ซึ่งแสดงสมบัติเป็นเทอร์โมเซต [23] แก้ไขได้โดยการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ โดยโมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์จะไปสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง เกิดการเคลื่อนผ่านกันได้ จึงง่ายขึ้นทำให้ใช้พลังงานน้อยลง พลาสติกไซเซอร์ที่นิยมใช้ได้แก่ กลีเซอรอล [24]

กลีเซอรอล (glycerol) หรือกลีเซอริน [25] (glycerine) เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทแอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม และมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ต่อกับคาร์บอน 3 หมู่ มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_3H_8O_3$  แสดงดังรูปที่ 2.6 กลีเซอรอลมีคุณสมบัติเป็นของเหลวที่มีความหนืด เป็นของเหลวใส คล้ายน้ำมันไม่มีกลิ่น ไม่มีสี มีน้ำหนักโมเลกุล 92.09 จุดเดือด 290 องศาเซลเซียส เป็นสารทำละลายน้ำมันได้ดีพอสมควร ผสมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีมาก ดูดความชื้นจากอากาศได้ปานกลาง





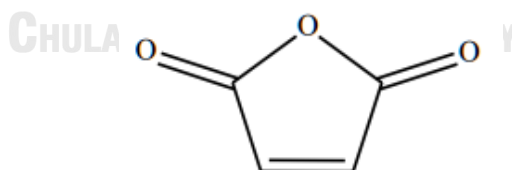
รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอล

## 2.8 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend)

พอลิเมอร์ผสม คือ การนำพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเกิดเป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่ เพื่อช่วยในการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้นซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก ปัจจัยหลักในการผสมนั้นจะต้องมีความเข้ากันได้ (compatibilisation) เพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ โดยสารเพิ่มความเข้ากันได้ (blend compatibilizer) ที่นิยมใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมมีดังนี้

### 2.8.1 มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) [26]

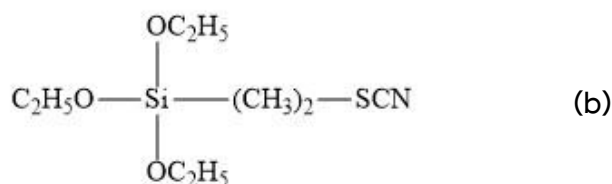
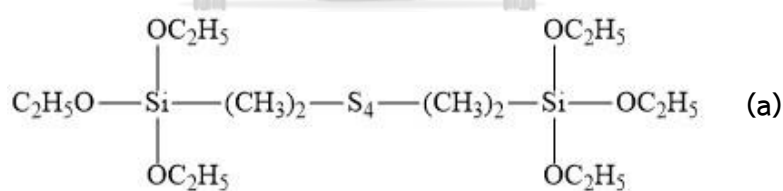
มาเลอิกแอนไฮไดรด์ หรือ cis-butenedioic anhydride เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_3$  แสดงดังรูปที่ 2.7 น้ำหนักโมเลกุล 98.06 กรัมต่อโมล โดยมาเลอิกแอนไฮไดรด์บริสุทธิ์จะมีลักษณะเป็นของแข็งไม่มีสีหรือมีสีขาว มีจุดเดือด 202 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลว 52-54 องศาเซลเซียส



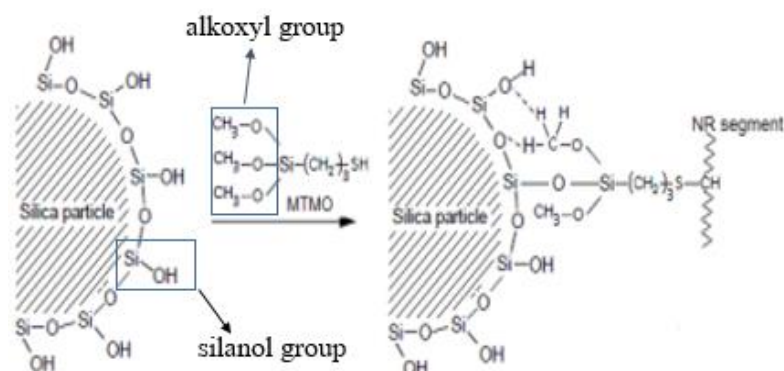
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [27]

## 2.8.2 สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) [28]

สารคู่ควบไซเลนเป็นสารเคมีที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ คือหมู่แอลคอกซี (alkoxyl group) เช่น หมู่เมทอกซี (-OCH<sub>3</sub>) หรือหมู่เอทอกซี (-OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>) และหมู่ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ (organo-functional group) เช่น หมู่เมอร์แคปโต เป็นต้น สูตรโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.8 หมู่แอลคอกซีสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ซิลานอลที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกาเกิดผ่านปฏิกิริยาไซลาไนเซชัน (silanization) เกิดเป็นพันธะซิลอกเซน (siloxane linkage) ที่เสถียรและมีการปลดปล่อยแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยาออกมา ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้พื้นผิวของซิลิกามีปริมาณหมู่ซิลานอลลดลง ทำให้อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกาเองลดลง ซิลิกาจึงแตกตัวและกระจายในยางได้ง่ายขึ้น ส่วนหมู่ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบจะเกิดการคู่ควบ (coupling) บางส่วนในระหว่างการผสมและระหว่างการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกับยางด้วยพันธะเคมี สารคู่ควบไซเลนจึงสามารถช่วยให้ยางยึดติดกับซิลิกาได้ดีขึ้น ตัวอย่างของสารคู่ควบไซเลนที่ใช้กันมาก ได้แก่ ไทรเอทอกซีซิลิลโพรพิลเททระซัลไฟด์ (bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfane; Si-69) และไทโอไซยานาโตโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-triocyanatopropyl triethoxy silane; Si-264) เป็นต้น โดยโครงสร้างเคมีของสารคู่ควบไซเลนดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.8 และกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับสารคู่ควบไซเลน แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 โครงสร้างเคมีของสารคู่ควบไซเลน (a) Si-69 และ (b) Si-264 [29]



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับสารคู่ควบไซเลน [30]

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ghasemloua และคณะ [31] ศึกษาสมบัติของฟิล์ม kefiran ซึ่งเป็นเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ในเม็ดคีเฟอร์ (kefir grain) กับพลาสติกไซเซออร์ 2 ชนิด คือ กลีเซอรอลและซอร์บิทอล พบว่าการใช้ กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ให้สมบัติของฟิล์มดีกว่าการใช้ซอร์บิทอล และเมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอล พบว่าฟิล์มที่ได้มีความยืดหยุ่นและมีค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้นแต่มีค่าต้านทานแรงดึงลดลง

Khalaf และคณะ [32] ศึกษาความเข้ากันได้และสมบัติของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์จากยางธรรมชาติผสมแป้งข้าวโพดโดยการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้คือ มาลิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MAH) กับกลีซิดิลเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate, GMA) เปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์จากยางธรรมชาติผสมแป้งข้าวโพดที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้มีสมบัติเชิงกลต่ำลงเมื่อปริมาณแป้งข้าวโพดเพิ่มขึ้น ซึ่งจากภาพถ่าย SEM เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ยางกับแป้งข้าวโพดมี อันตรกิริยาต่อกันที่ต่ำมาก แต่เมื่อเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่าการกระจายตัวของแป้งข้าวโพดในยางเกิดได้ดีขึ้น การเติม GMA และ MAH ยังทำให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเติม GMA ทำให้แป้งข้าวโพดรวมกลุ่มกันน้อยกว่า MAH

Duy และคณะ [33] ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์จากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง (cassava starch) โดยใช้กระบวนการเตรียมที่ต่างกัน 2 เทคนิค คือเทคนิคการจับตัว (co-coagulation method) โดยนำน้ำยางผสมกับแป้งมันสำปะหลังที่ทำการ

เจลาตินไนซ์ แล้วเติมแคลเซียมคลอไรด์ เพื่อให้จับตัว อบให้แห้ง ใส่สารคงรูปและสารเติมแต่งอื่น ๆ ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง และเทคนิคการผสมโดยตรง (direct blending method) คือผสมทุกอย่างรวมกันในเครื่องผสมเลย จากการศึกษา พบว่าแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากเทคนิคการจับตัวมีขนาดเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่เล็กกว่า จึงเกิดแรงยึดเหนี่ยวและสามารถกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีกว่า ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีเสถียรภาพต่อความร้อน ความทนต่อแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาดดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคการผสมโดยตรง

Piemaria และคณะ [34] ศึกษาสมบัติของฟิล์ม kefirin ซึ่งเป็นเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ในเม็ดคีเฟอร์ พบว่าฟิล์ม kefirin มีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำสูง เมื่อเติมกลีเซอรอล 25 กรัม/100 กรัมของพอลิแซ็กคาไรด์ ให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำที่  $4.09 \times 10^{-11}$  g/m s Pa สำหรับแผ่นฟิล์มที่ไม่เติมกลีเซอรอลมีลักษณะแข็งเปราะและแข็ง โดยมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) และค่าความต้านทานแรงฉีกขาดสูงและมีการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นต่ำ (low deformation at break) การเติมกลีเซอรอลทำให้ค่าการยึดตัวสูงขึ้นและให้ความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับฟิล์มจากพอลิเมอร์สังเคราะห์

Piermaria และคณะ [35] ศึกษาสมบัติของฟิล์ม kefirin ซึ่งเป็นเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ในเม็ดคีเฟอร์ซึ่งมีลักษณะแข็งเปราะจึงปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำได้โดยใช้พลาสติกไฮเซออร์ทั้งสองชนิดคือน้ำตาล (กลูโคส, กาแลคโตสและซูโคส) และพอลิแอล (กลีเซอรอล และซอร์บิทอล) พบว่าฟิล์ม kefirin ที่มีการเติมกลูโคสเป็นพลาสติกไฮเซออร์ให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำต่ำที่สุดในขณะที่ฟิล์ม kefirin ที่เติมกลีเซอรอลให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

Matta และคณะ [36] ศึกษาผลของกลีเซอรอลต่อฟิล์มที่เตรียมจากแป้งกล้วยร่วมกับแซนแทนกัม จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลทำให้ความสามารถในการเกิดผลึกของฟิล์มลดลงอีกทั้งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม โดยฟิล์มมีค่าความทนต่อแรงดึงลดลงแต่มีค่าการยึดตัวเมื่อขาดสูงขึ้น

Ehivet และคณะ [37] ศึกษาอิทธิพลของพลาสติกไฮเซออร์ 4 ชนิด คือ ซูโครส, ซอร์บิทอล, กลีเซอรอลและพอลิเอทิลีนไกลคอลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติขวางกั้น (barrier properties) ของแผ่นฟิล์มแป้งมันเทศ (sweetpotato starch film; SPSF) พบว่า SPSF ที่เติมซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไฮเซออร์มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด คือ มีค่าต้านทานแรงฉีกขาด, ค่าการยึดตัวเมื่อขาดและการซึมผ่านไอน้ำเท่ากับ 7.96 Mpa, 77.92 เปอร์เซ็นต์ และ 0.212 g/m s Pa ตามลำดับ

Sanyang และคณะ [38] ศึกษาอิทธิพลของชนิดพลาสติกไซเซออร์ ได้แก่ กลิเซอรอลและซอร์บิทอลและความเข้มข้นต่างๆ คือ 0, 15, 30 และ 45 w/w% ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติขวางกันของแผ่นฟิล์มจากแป้งของต้นตาล (sugar palm: arenga pinnata) พบว่าพลาสติกไซเซออร์ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อปริมาณพลาสติกไซเซออร์เพิ่มขึ้นจาก 15% เป็น 45% ส่งผลให้ฟิล์มแป้งของต้นตาลมีค่าความทนต่อแรงดึงที่ลดลง, เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นและค่าการซึมผ่านไอน้ำ (water vapor permeability) เพิ่มขึ้นจาก  $4.855 \times 10^{-10}$  เป็น  $8.70 \times 10^{-10} \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$

Wang และคณะ [39] ศึกษาสมบัติเชิงกลของ starch/NR composite โดยมีการตัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) ได้เป็น starch xanthate จากนั้นนำ starch xanthate ผสมกับน้ำยางโดยใช้ปริมาณแป้ง 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 phr ตามลำดับ จากนั้นใส่กรดอะซิติกเพื่อให้ น้ำยางและ starch xanthate จับตัวเป็นก้อนแข็งด้วยเทคนิคการจับตัวแล้วนำไปล้างน้ำหลายครั้ง อบที่ 75 องศาเซลเซียส ได้เป็น modified starch/NR blends จากผลการทดลองพบว่า สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งโดยปริมาณ starch xanthate 20 phr ส่งผลต่อสมบัติที่ดีที่สุด

Vudjung และคณะ [40] ศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำและความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์เชื่อมโยงโครงร่างตาข่าย (interpenetrating polymer network ; IPN) จาก crosslinked natural rubber (NR) latex และ crosslinked cassava starch (St) ที่เตรียมโดยเทคนิค solution blending โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (KPS) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) และ N, N'-methylene-bis-acrylamide (MBA) เป็นสารเชื่อมขวางของ NR ส่วน maleic anhydride (MA) ใช้เป็นสารเชื่อมขวางของ St ทำการเตรียมแผ่นฟิล์ม interpenetrating polymer network ของ natural rubber/cassava starch (IPN NR/St) ได้โดยนำน้ำยางชั้น 60% จำนวน 150 กรัมใส่ขวดก้นกลมแล้วใส่น้ำกลั่น 100 ml ใส่ KOH 1 phr และ emulvin WA 5 phr ซึ่งใช้เป็น buffer และ stabilizer ตามลำดับ กวนต่อเนื่องแล้วให้ความร้อนสูงถึง 70°C จากนั้นใส่ KPS จำนวน 1 phr พร้อมกวนเป็นเวลา 15 นาทีแล้วใส่ MBA จำนวน 1 phr เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นหยุดปฏิกิริยาโดยตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำน้ำยางเชื่อมขวางที่ได้มาผสมกับแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการเจลาติไนซ์และ MA แล้วกวนที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมงเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำสารละลายที่ได้เทลงแม่พิมพ์กระจกแล้วนำไปอบ 60°C ทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางในตู้อบที่ 120°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ได้เป็นแผ่นฟิล์ม IPN-NR/St จากผลการทดลองพบว่า การดูดซับน้ำและสมบัติความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์ม IPN-NR/St ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ NR เนื่องจากโมเลกุลของ

NR ป้องกันไฮโดรเจลจากการละลายในน้ำแต่มีค่าการยึดตัวเมื่อขาดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อแช่แผ่นฟิล์ม IPN-NR/St ในน้ำเป็นเวลานานทำให้สมบัติการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ NR เนื่องจาก NR มีความยืดหยุ่นสามารถกักเก็บน้ำได้มากและโมเลกุล St ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxylgroups) จำนวนมากส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น

Zeng และคณะ [41] ศึกษาความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยฝ้าย โดยนำยางธรรมชาติผสมกับ MA ใน internal mixer ที่อุณหภูมิ 150 °C ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที ได้ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleated natural rubber; MNR) จากการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1784 และ 1860  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่า MA กราฟท์บนยางธรรมชาติจริง ส่วนคอมพอลสิตที่มี MNR พบว่าพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1784 และ 1860  $\text{cm}^{-1}$  มีการเปลี่ยนไปเป็นที่เลขคลื่น 1780 และ 1856  $\text{cm}^{-1}$  เนื่องมาจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ เมื่อทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ MA ใน MNR ส่งผลให้คอมพอลสิตมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าคอมพอลสิตที่ไม่มี MNR ดังนั้น MNR จึงเป็นสารคู่ควบที่สามารถเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยฝ้าย

Duangkamol และคณะ [42] ศึกษาสมบัติเชิงกลและความเข้ากันได้ของคอมพอลสิตจากยางธรรมชาติผสมกับฟิลเลอร์ (filler) ชนิดต่างๆ โดยใช้ฟิลเลอร์จากธรรมชาติ ได้แก่ ยางครัมป์ (crumb rubber), เถ้าแกลบ (rice husk ash) และตะกอนแป้ง (starch sludge) เปรียบเทียบกับตัวเติมเสริมแรงเกรดการค้า (commercial reinforcing fillers) ได้แก่ คาร์บอนแบล็ค (carbon black) และซิลิกา (silica) นำคอมพอลสิตที่ได้มาเปรียบเทียบกับที่เติมสารคู่ควบ (coupling agent) ได้แก่ maleated natural rubber (MNR) หรือ silane (Si69) เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเมทริกซ์ยางและฟิลเลอร์ จากผลการทดลองพบว่า สมบัติเชิงกลลดลงเมื่อเพิ่มตะกอนแป้ง เมื่อศึกษาความเข้ากันได้พบว่า MNR เป็นสารคู่ควบที่ดีกว่า Si69 เนื่องจากส่งผลให้อนุภาคฟิลเลอร์กระจายในเมทริกซ์ยางโดยไม่เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่

Trovatti และคณะ [43] ศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch; TPS) กับ oxidized natural rubber (ONR) เตรียมโดยนำน้ำยางธรรมชาติผสมกับสารละลาย  $\text{KMnO}_4$  ที่อุณหภูมิห้อง โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดตรงตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาติทำให้มีสมบัติเป็นขั้วมากขึ้นได้เป็น ONR หลังจากนั้นมาผสมกับ TPS ซึ่งมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ด้วยกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (extrusion Process) จากผล

การทดลองพบว่า ONR และ TPS ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลมีอันตรกิริยาระหว่างกันเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนเพิ่มความเข้ากันได้มากขึ้น

Ismail และคณะ [44] เตรียมคอมพอสิตระหว่างยางธรรมชาติกับเยื่อกระดาษ (paper sludge) โดยใช้ยางธรรมชาติ 2 ชนิด คือ ENR 50 และ SMR L ผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเยื่อกระดาษใน ENR 50 และ SMR L ส่งผลให้คอมพอสิตที่ได้มีค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง โดยคอมพอสิตของ ENR 50 มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่าคอมพอสิตของ SMR L เนื่องจากการยึดติดที่ตีระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเยื่อกระดาษกับหมู่อีพอกซีของ ENR 50 จากภาพถ่าย SEM พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเยื่อกระดาษใน ENR 50 และ SMR L มากขึ้นเกิดการรวมกลุ่มเป็นก้อน และเยื่อกระดาษกระจายตัวใน ENR 50 ได้ดีกว่า SMR L

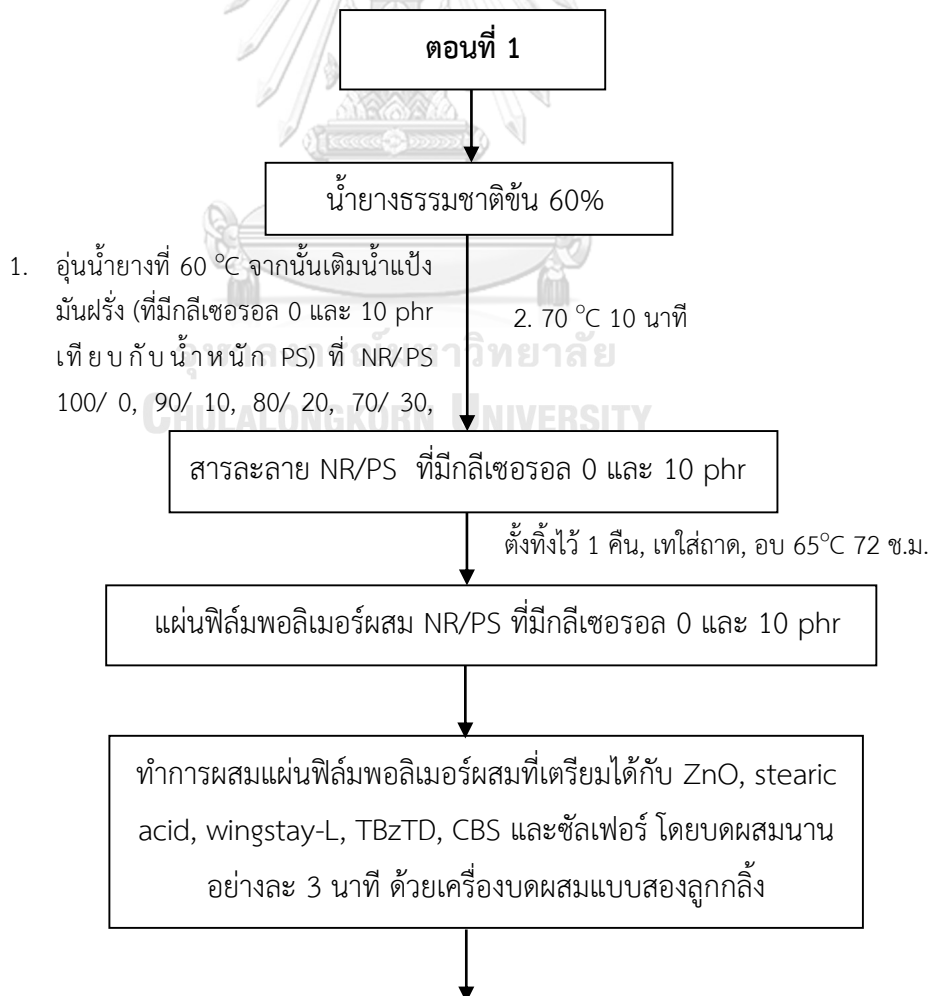
Rouily และคณะ [45] เตรียมคอมพอสิตจากยางธรรมชาติและแป้ง โดยตัดแปรโมเลกุลยางธรรมชาติด้วยการกราฟต์ด้วย dimethylamide methacrylate (DMAEMA) เพื่อให้มีลักษณะคล้ายเส้นผมที่ยื่นออกมาซึ่งส่วนนี้เป็นพอลิเมอร์แบบประจุบวกที่ชอบน้ำเรียกว่า polyDMAEMA สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแป้งได้ ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างยางและแป้งเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงอย่างมาก นั่นคือ โมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลง แต่ความสามารถในการยืดตัวสูงสุดกลับมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อนำตัวอย่างมาศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านพบว่า เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงระหว่างผิวของน้ำยางธรรมชาติที่ตัดแปรกับแป้ง แสดงให้เห็นว่ายางและแป้งสามารถเข้ากันได้ดี

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยมีความสนใจจะพัฒนาแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งโดยจะทำการเตรียมด้วยกัน 2 วิธี ประกอบด้วย เทคนิคการหล่อฟิล์มโดยการผสมน้ำยางกับน้ำแป้งจากนั้นก็เทลงในแม่พิมพ์กระจกแล้วนำแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปผสมกับสารเคมีสำหรับยางในเครื่องผสม และเทคนิคการผสมแบบโดยตรงจะเป็นการผสมแป้งกับยางในเครื่องผสมเลย โดยจะศึกษาอิทธิพลของชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติการดูดซับน้ำ และสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้

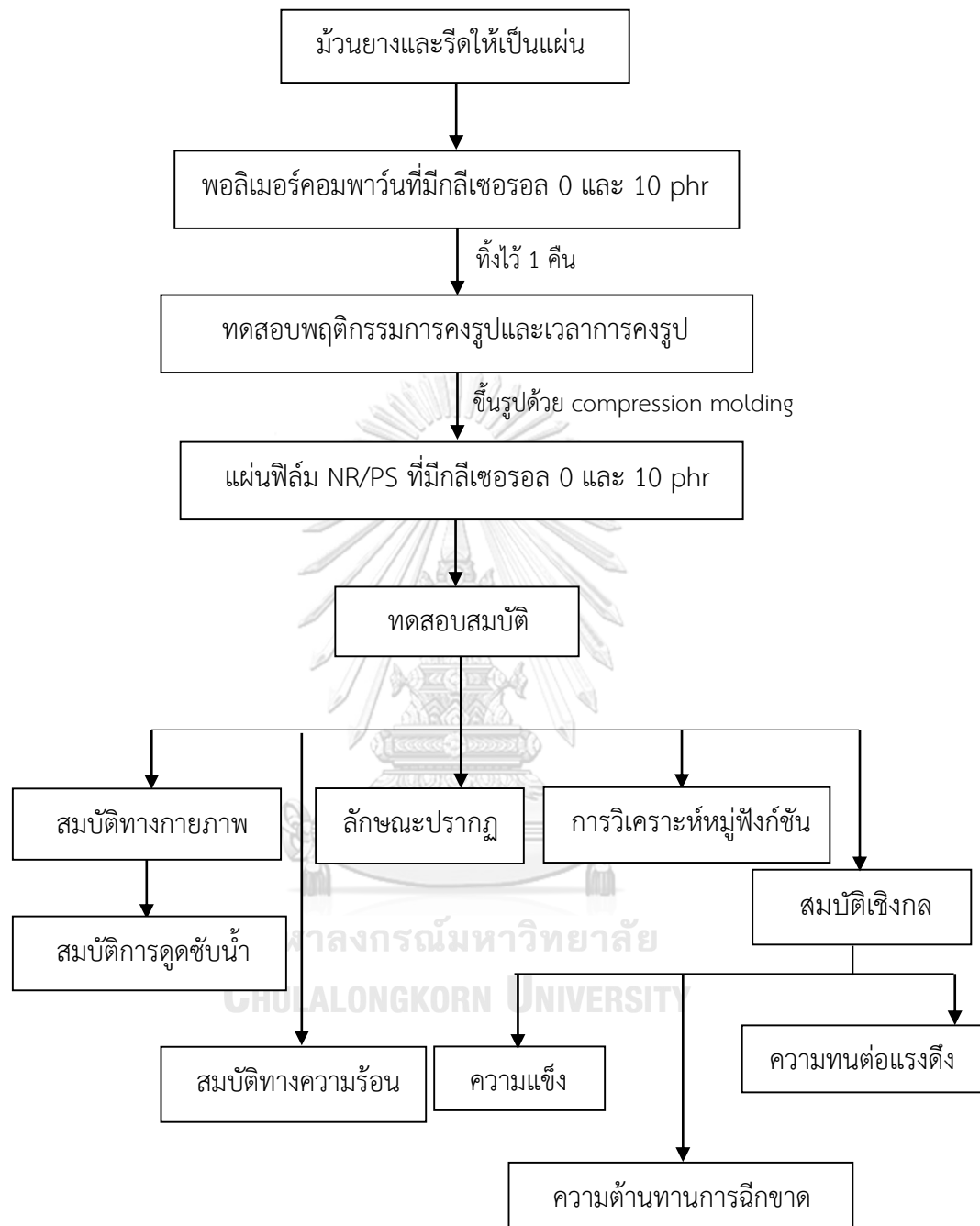
### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินการวิจัย

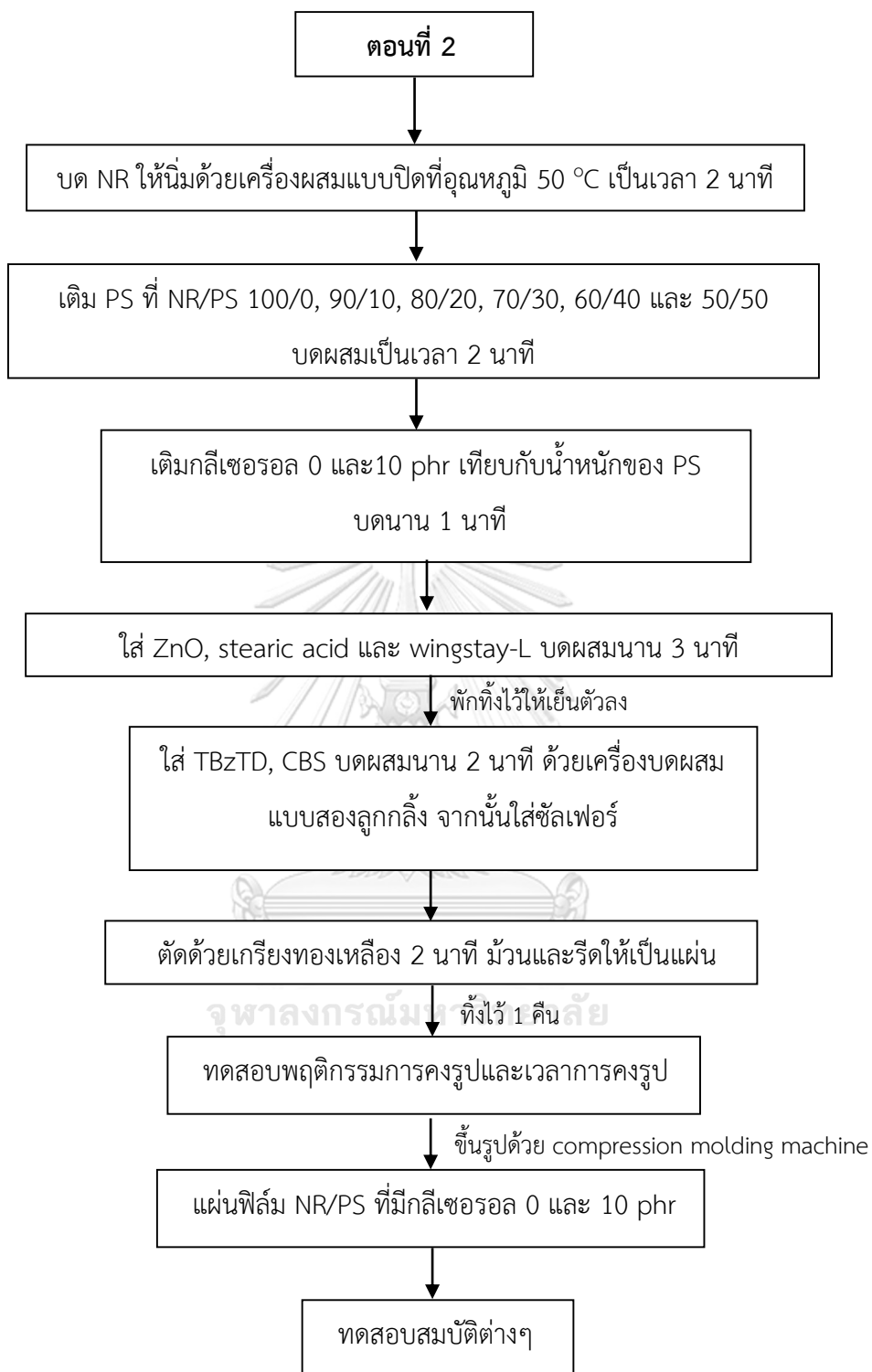
งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับแป้งมันฝรั่ง (PS) ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ทั้งที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ ด้วยกระบวนการเตรียมแบบ latex mixing และแบบ dry mixing จากนั้นจะทำการวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อแป้งมันฝรั่ง อิทธิพลของสารเพิ่มความเข้ากันได้ และอิทธิพลของกระบวนการเตรียมต่อสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติการดูดซับน้ำ หมูฟงก์ชัน สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มที่ได้ โดยการดำเนินการวิจัยจะแบ่งออก 3 ตอน คือ การเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์โดยเทคนิค latex mixing และ dry mixing โดยแผนการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1 - 3.3 ตามลำดับ



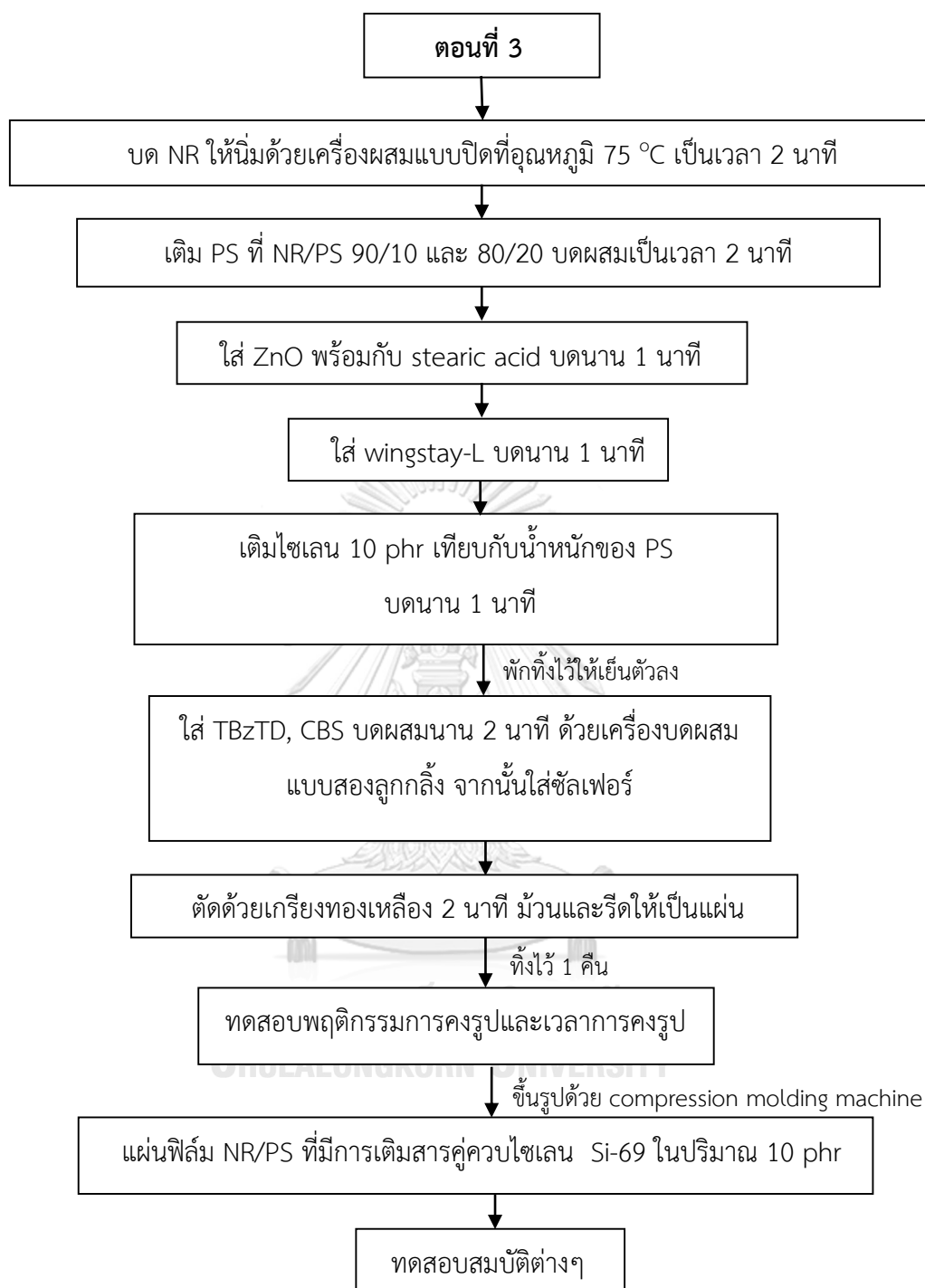




รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง  
จากกระบวนการผสมแบบ latex mixing



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง  
จากกระบวนการผสมแบบ dry mixing



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง  
ที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 โดยกระบวนการผสมแบบ dry mixing

### 3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบ/สารเคมี	บริษัทผู้ผลิต
-ยางธรรมชาติ	สถาบันวิจัยยาง
ทำหน้าที่เป็นพอลิเมอร์	
-แป้งมันฝรั่ง	บริษัท อัจฉิตต์อินเตอร์เนชั่นเนล
ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม	เพ็พเพอร์ แอนด์ สไปซ์ จำกัด
-กลีเซอรอล	Thermofisher scientific
ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์และ	
เพิ่มความเข้ากันได้	
-สารควบคู่ซิลิโคน Si-69	บริษัทไมโครซิน
ทำหน้าที่เป็นสารควบคู่ปฏิกิริยา	
-ซิงค์ออกไซด์	บริษัทไมโครซิน
ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์	
(activator)	
-กรดสเตียริก	บริษัทไมโครซิน
ทำหน้าที่เป็นเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์	
(activator)	
-Wingstay <sup>®</sup> L	การยางแห่งประเทศไทย
(butylated reaction product of p-cresol and dicyclopentadiene)	
ทำหน้าที่เป็นสารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant)	
-N-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamide (CBS)	บริษัทไมโครซิน
ทำหน้าที่เป็นสารเร่งวัลคาไนซ์ (accelerator)	

### ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบและสารเคมี (ต่อ)

วัตถุดิบ/สารเคมี	บริษัทผู้ผลิต
-tetrabenzylthiuram disulfide (TBzTD) ทำหน้าที่เป็นสารเร่งวัลคาไนซ์ (accelerator)	บริษัทไมโครซิน
-กำมะถัน ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent)	บริษัทไมโครซิน

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและทดสอบสมบัติแสดงดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

#### ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์/เครื่องมือ	บริษัทผู้ผลิต/รุ่น
-เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill)	Lab Tech Engineering
-เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)	Lab Tech Engineering รุ่น MX500- D75L90
-เครื่องอัดแบบ (compression molding machine)	Lab Tech Engineering รุ่น - 18- CX
-เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบระบบไฮดรอลิก	ห้างหุ้นส่วนจำกัด บางใหญ่พลาสติก
-เครื่องวัดความหนา (vernier caliper) ความละเอียด 0.01 mm	รุ่น Mitutoyo

### ตารางที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

อุปกรณ์/เครื่องมือ	บริษัทผู้ผลิต/รุ่น
-เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)	Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700
-เครื่องวัดการคงรูป (moving die rheometer, MDR)	บริษัท หจก.ซีจี เอ็นจิเนียริง Techpro รุ่น A022S-rheo TECH MD+
-เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine, UTM)	รุ่น 5ST
-เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (thermogravimetric analyzer, TGA)	บริษัทเมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทยจำกัด) รุ่น TGA/DSC3+
-เครื่องทดสอบความแข็งแบบชอร์เอ (shore A) (hardness durometer)	รุ่น durometer hardness system shore A

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.3 วิธีการทดลอง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

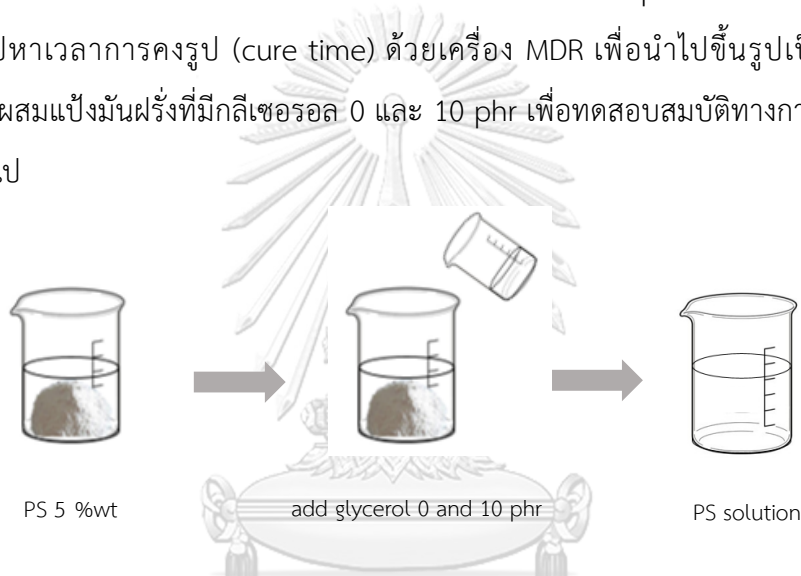
#### 3.3.1 การเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

##### 3.3.1.1 การเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีและ

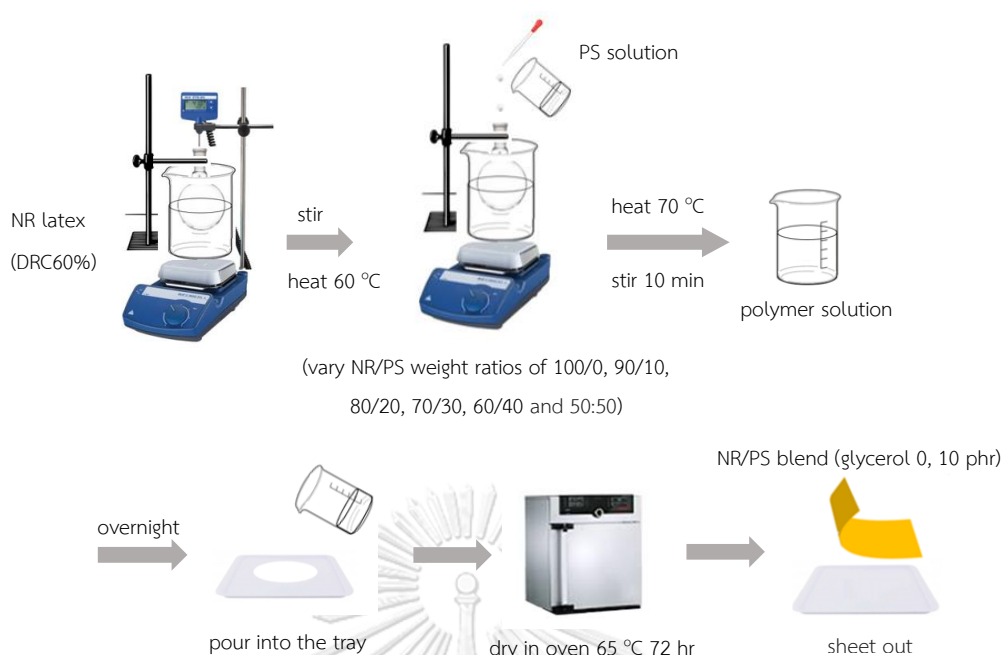
##### ไม่มีกลีเซอรอลด้วยกระบวนการ latex mixing

นำแป้งมันฝรั่ง 5 กรัม มากระจายตัวในในน้ำ 95 กรัม เดิมกลีเซอรอล (0 และ 10 phr เทียบกับน้ำหนักของแป้งมันฝรั่ง) ได้เป็นสารละลายแป้งมันฝรั่ง แสดงดังรูปที่ 3.4 แล้วค่อยๆ นำมาหยดลงใน น้ำยางธรรมชาติเข้มข้น 60% ที่มีอุณหภูมิ 60 °C โดยให้ได้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อแป้งมันฝรั่งที่ (NR/PS) 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิถึง 70 °C กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน จากนั้น

นำไปทำการขึ้นรูปโดยเทลงบนถาดพลาสติก แล้วนำไป อบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ได้เป็นแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีกลีเซอรอล 0 และ 10 phr แสดงดังรูปที่ 3.5 จากนั้นนำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปผสมกับสารเคมีสำหรับยางด้วยเครื่อง two roll mill ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ที่อุณหภูมิ 50 °C โดยรอบการหมุนลูกกลิ้งตัวหน้าต่อตัวหลังอยู่ที่ 14.1:16.8 rpm และ ตั้งค่าระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่ 1 mm ทำการบดให้ยางนิ่มเป็นเวลา 3 นาที โดยสูตรคอมพาว์นแสดงดังตารางที่ 3.4 จากนั้นปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่ไปที่ 0.5 mm จากนั้นทำการใส่ ZnO, stearic, wingstay-L, TBzTD, CBS และซิลิเฟอร์ ตามลำดับทุก 3 นาที จากนั้นทำการม้วนและรีดให้เป็นแผ่นใช้เวลาทั้งหมด 30 นาที ได้เป็นคอมพาว์นที่มีกลีเซอรอล 0 และ 10 phr จากนั้นนำไปพักทิ้งไว้ 1 คืน แล้วนำไปหาเวลาการคงรูป (cure time) ด้วยเครื่อง MDR เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีกลีเซอรอล 0 และ 10 phr เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลต่อไป



รูปที่ 3.4 การเตรียมสารละลายแป้งมันฝรั่ง



รูปที่ 3.5 การเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล

### 3.3.1.2 การเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีและไม่มีกลีเซอรอลด้วยกระบวนการ dry mixing

นำน้ำยางธรรมชาติเข้มข้น 60% เทใส่ถาดอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ลอกเป็นแผ่นฟิล์มแล้วนำไปบดให้หยาบด้วยเครื่อง Internal mixer แสดงดังรูปที่ 3.7 ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วในการหมุน 60 rpm เป็นเวลา 2 นาที โดยสูตรคอมพาว์นแสดงดังตารางที่ 3.4 จากนั้นใส่แป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ดังนี้ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 บดผสมเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมกลีเซอรอล 0 และ 10 phr เทียบกับน้ำหนักของ PS แล้วบดผสมต่อเป็นเวลา 1 นาที ใส่ ZnO, stearic, wingstay-L ตามลำดับ บดนาน 3 นาที จากนั้นนำไปพักทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงเพื่อป้องกันยางตาย จากนั้นทำการผสมด้วยเครื่อง two roll mill ที่อุณหภูมิ 50 °C โดยรอบการหมุนลูกกลิ้งตัวหน้าต่อตัวหลังอยู่ที่ 14.1:16.8 rpm และ ตั้งค่าระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่ 0.5 mm โดยใส่ TBzTD และ CBS พร้อมกันแล้วผสมเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นใส่ซัลเฟอร์เป็นลำดับสุดท้าย ตัดแบบเฉียงด้วยเกรียงทองเหลืองนาน 2 นาที โดยเวลาการผสมจะอยู่ที่ 8 นาที จากนั้นนำคอมพาว์นที่ได้ไปพักทิ้งไว้ 1 คืน แล้วนำไปหาเวลาการคงรูปด้วยเครื่อง MDR จากนั้นนำไปขึ้นรูปได้เป็นแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีกลีเซอรอล 0 และ 10 phr เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลต่อไป



### 3.3.1.3 การเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมสารคู่ควบ

#### ไซเลน Si-69 ด้วยกระบวนการ dry mixing

นำยางธรรมชาติไปบดให้ نرم ด้วยเครื่อง Internal mixer แสดงดังรูปที่ 3.7 ที่อุณหภูมิ 75 °C ความเร็วในการหมุน 60 rpm เป็นเวลา 2 นาที โดยสูตรคอมพาวด์แสดงดังตารางที่ 3.4 จากนั้นใส่แป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ดังนี้ 90/10 และ 80/20 บดผสมเป็นเวลา 2 นาที ใส่ ZnO พร้อมกับ stearic บดนาน 1 นาที ใส่ wingstay-L บดนาน 1 นาที ใส่ไซเลน 10 phr เทียบกับน้ำหนักของ PS แล้วบดนาน 1 นาที จากนั้นนำไปพักทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงเพื่อป้องกันยางตาย จากนั้นทำการผสมด้วยเครื่อง two roll mill ที่อุณหภูมิ 50 °C โดยรอบการหมุนลูกกลิ้ง ตัวหน้าต่อตัวหลังอยู่ที่ 14.1:16.8 rpm และตั้งค่าระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่ 0.5 mm โดยใส่ TBzTD และ CBS พร้อมกัน แล้วผสมเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นใส่ซิลิโคนเป็นลำดับสุดท้าย ตัดแบบเฉียงด้วยเกรียงทองเหลืองนาน 2 นาที โดยเวลาการผสมจะอยู่ที่ 12 นาที จากนั้นนำคอมพาวด์ที่ได้ไปพักทิ้งไว้ 1 คืน แล้วนำไปหาเวลาการคงรูปด้วยเครื่อง MDR จากนั้นนำไปขึ้นรูปได้เป็นแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้ง มันฝรั่งที่มีไซเลน 10 phr เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลต่อไป

### ตารางที่ 3.4 สูตรคอมพาว์น

สารเคมี	ปริมาณสารเคมี (phr) <sup>a</sup>
rubber <sup>b</sup>	100.0
compatibilizer <sup>c</sup>	0, 10
zinc oxide	3.0
stearic acid	1.0
wingstay-L <sup>d</sup>	2.0
TBZTD <sup>e</sup>	0.4
CBS <sup>f</sup>	1.5
sulfur	2.0

<sup>a</sup>ส่วนในร้อยละของยาง (parts per hundred rubber) : <sup>b</sup>NR/PS 90:10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50:50

<sup>c</sup>glycerol/silane coupling agent Si-69

<sup>d</sup>butylated reaction product of p-cresol and dicyclopentadiene

<sup>e</sup>tetrabenzylthiuram disulfide

<sup>f</sup>N-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamide



รูปที่ 3.6 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง

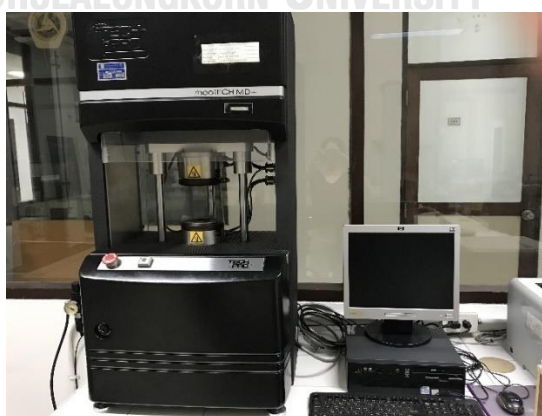


รูปที่ 3.7 เครื่องผสมแบบปิด

### 3.3.2 การวิเคราะห์และขึ้นรูป

#### 3.3.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะการคงรูปของยาง หาเวลา cure time

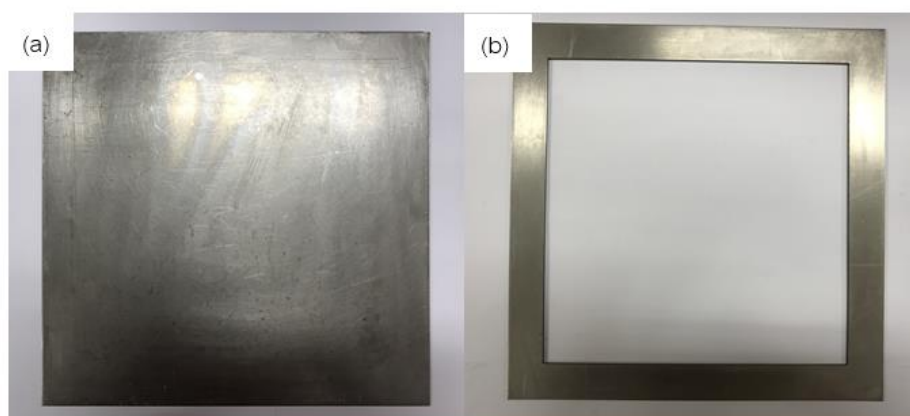
ลักษณะการคงรูปของยางถูกทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบโรโรเตอร์ (moving die rheometer, MDR) ดังรูปที่ 3.8 ตามมาตรฐาน ASTM D 5289 โดยจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 155 °C เป็นเวลา 20 นาที เมื่อตั้งค่าข้อมูลที่ใช้ทดสอบแล้วนำตัวอย่างขึ้นงานเข้าเครื่องทดสอบ กดปุ่ม close จากนั้นรอเวลาให้ยางสุกตามเวลาที่ตั้งไว้ 20 นาที หลังจากนั้นนำเวลาในการคงรูปที่ 90% ( $T_{90}$ ) ที่ได้จากการทดสอบไปใช้ในขั้นตอนการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ



รูปที่ 3.8 เครื่องรีโอมิเตอร์

### 3.3.2.2 การเตรียมและการขึ้นรูปชิ้นงานโดยกระบวนการอัดขึ้นรูป

นำยางคอมพาว์นมาตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแล้ววางลงในแม่พิมพ์ (mold) ขนาด 170 mm x 170 mm x 1.9 mm แสดงดังรูปที่ 3.9 รองด้วยแผ่นพลาสติกใส จากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบแสดงดังรูปที่ 3.10 อุณหภูมิ 155 °C ตามเวลา  $T_{90}$  ที่ได้จากเครื่องรีโอมิเตอร์ ได้แผ่นฟิล์มที่มีความหนา 2 mm นำชิ้นงานที่ได้ออกจากแม่พิมพ์ วางพักทิ้งไว้เพื่อให้เย็นตัว แล้วนำไปตัดเป็นชิ้นทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.9 ชุดแม่พิมพ์สแตนเลสรูปสี่เหลี่ยมขนาด 170 mm x 170 mm x 1.9 mm



รูปที่ 3.10 เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด

### 3.3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆ

#### 3.3.3.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

- การทดสอบความแข็ง (hardness) แบบชอร์เอ (shore A)

การทดสอบความแข็งของฟิล์มยางด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (hardness tester, durometer) ตาม ASTM D2240-03 โดยใช้หัวทดสอบแบบ shore A แสดงดังรูปที่ 3.11 ทำการวัดความแข็งของยางโดยกดเครื่องวัดความแข็งค้างไว้นาน 5 วินาที ที่ตำแหน่งต่างๆ กัน 5 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยและบันทึกค่าไว้โดยความแข็งที่ทดสอบได้มีหน่วยเป็น shore A



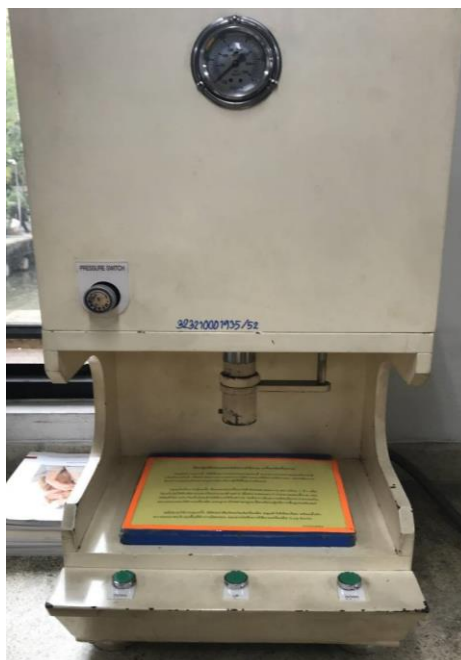
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความแข็งแบบชอร์เอ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- สมบัติความทนแรงดึง (tensile strength)

การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการคงรูปแล้วนำมาตัดเป็นชิ้นงานรูปทรงแบบดัมเบลล์ ด้วยเครื่องตัดชิ้นงานทดสอบระบบไฮดรอลิกดังรูปที่ 3.12 ตามมาตรฐาน ISO 37 Type II ได้เป็นชิ้นงานทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.13 จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงด้วยเครื่อง universal testing machine รุ่น 5ST แสดงดังรูปที่ 3.14 กำหนดภาวะที่ใช้ในการทดสอบคือ ใช้น้ำหนักเซลล์ (load cell) ขนาด 5 กิโลนิวตัน ใช้อัตราเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตร/นาที และระยะที่วัดการยืดออกหรือระยะดึง (gauge length) 25 มิลลิเมตร โดยมี

การวัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบที่บริเวณ gauge length อย่างละ 3 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ย ทำการบันทึกค่าความทนแรงดึง โดยทดสอบซ้ำอย่างน้อย 5 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.12 เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบระบบไฮดรอลิก



รูปที่ 3.13 ลักษณะตัวอย่างชิ้นงานรูปดัมเบลล์สำหรับทดสอบความทนแรงดึง

โดยจากการทดลองจะได้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าความทนต่อแรงดึง} = \frac{\text{ค่าแรงดึง ณ จุดขาด}}{\text{พ.ท.ตัดขวางของชิ้นงาน}} = \frac{F}{A}$$

$$\% \text{ การยืดตัว ณ จุดขาด} = \frac{\text{ความยาวของชิ้นงาน ณ จุดขาด} - \text{ความยาวของชิ้นงานตั้งต้น}}{\text{ความยาวของชิ้นงานตั้งต้น}} \times 100$$

$$= \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบ universal testing machine รุ่น 5ST

- สมบัติความทนแรงฉีกขาด (tear strength)

การทดสอบสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ ทำได้โดยนำแผ่นขึ้นทดสอบมาตัดเป็นรูป angle ตามมาตรฐาน ISO 34 ได้เป็นชิ้นงานตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.15 จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine รุ่น 5ST แสดงดังรูปที่ 3.14 โดยภาวะในการทดสอบคือ load cell 5 กิโลนิวตัน ทำการดึงด้วยอัตราเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตร/นาที ทำการบันทึกค่า tear strength โดยทดสอบซ้ำอย่างน้อย 5 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.15 ชิ้นทดสอบแบบ angle สำหรับทดสอบความทนการฉีกขาด

### 3.3.3.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของชิ้นงานด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์ม

#### อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี

การทดสอบและวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของชิ้นงานแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrometer; FT-IR) ด้วยเทคนิค ATR-FTIR ของบริษัท thermo scientific รุ่น Nicolet 6700 แสดงดังรูปที่ 3.16 ในช่วงเลขคลื่น  $4000-500\text{ cm}^{-1}$ , resolution  $4\text{ cm}^{-1}$  จำนวนสแกน 34 รอบต่อครั้ง





รูปที่ 3.16 เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

### 3.3.3.3 สมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์ (thermogravimetric analyzer, TGA) ของบริษัท mettler Toledo รุ่น TGA/DSC3+ แสดงดังรูปที่ 3.17 เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงาน โดยตัดตัวอย่างชิ้นงานที่ได้ทำการขึ้นรูปไว้แล้วบรรจุลงในครูซิเบิลอะลูมินา 5-6 มิลลิกรัม แล้วทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50-600 °C โดยอัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 °C/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่ไหลด้วยอัตราเร็ว (gas flow rate) 40 มิลลิลิตร/นาที ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้หลังจากการทดสอบเสร็จแล้วนำครูซิเบิลอะลูมินาไปเผาไฟเพื่อกำจัดส่วนที่เหลือตกค้างให้หลุดไปก่อนที่จะทำการทดสอบต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.17 เครื่อง thermal gravimetric analyzer (TGA)

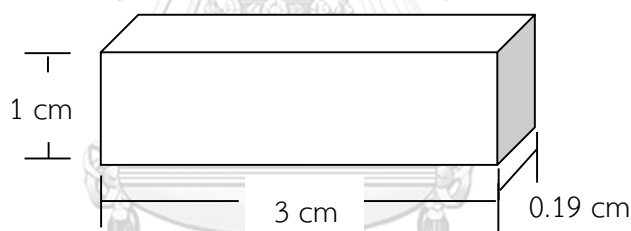
### 3.3.3.4 ความสามารถในการดูดซับน้ำ

การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption) ของชิ้นทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูปทำได้โดยนำชิ้นงานมาตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มี ขนาด  $1 \times 3 \times 0.19$  cm แสดงดังรูปที่ 3.18 ตัวอย่างละ 5 ชิ้น จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักที่แน่นอน ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งและกำหนดเป็นน้ำหนักเริ่มต้น ( $w_1$ ) จากนั้นนำชิ้นงาน ไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 7 วัน แสดงดังรูปที่ 3.19 แล้วนำชิ้นมาชั่งด้วยกระดาศิซซูและทำการชั่ง น้ำหนักอีกครั้ง ( $w_2$ ) จดบันทึกน้ำหนักที่ได้โดยร้อยละการดูดซับน้ำ (%water absorption) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\% \text{ water absorption} = ((w_2 - w_1) / w_1) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ  $w_1$  = น้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนแช่ในน้ำ

$w_2$  = น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังแช่ในน้ำ



รูปที่ 3.18 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับน้ำ



รูปที่ 3.19 การทดสอบการดูดซับน้ำของชิ้นงาน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะพัฒนาแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง (NR/PS) ที่อัตราส่วนต่างๆ กันตั้งแต่ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 โดยจะมีกระบวนการเตรียมด้วยกัน 2 เทคนิค คือ การผสมน้ำยางธรรมชาติกับน้ำแป้ง จากนั้นทำการอบให้แห้งแล้วนำไปผสมกับสารเคมียางอื่นในเครื่องผสมยางต่อไป หรือในที่นี้จะเรียกว่า การผสมแบบ latex mixing และ อีกวิธีจะทำการผสมแป้งกับยางธรรมชาติแห้งในเครื่องผสมยางและตามด้วยสารเคมีต่างๆ จะเรียกเทคนิคนี้ว่า การผสมแบบ dry mixing และจะมีการทดลองเติมสารเคมีต่างๆ กัน เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพต่างๆ ดังนี้ โครงสร้างทางเคมี การดูดซับน้ำ สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความทนต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ความต้านทานการฉีกขาดและความแข็ง ซึ่งผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 4.1 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing

##### 4.1.1 สมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิค

##### การผสมแบบ latex mixing

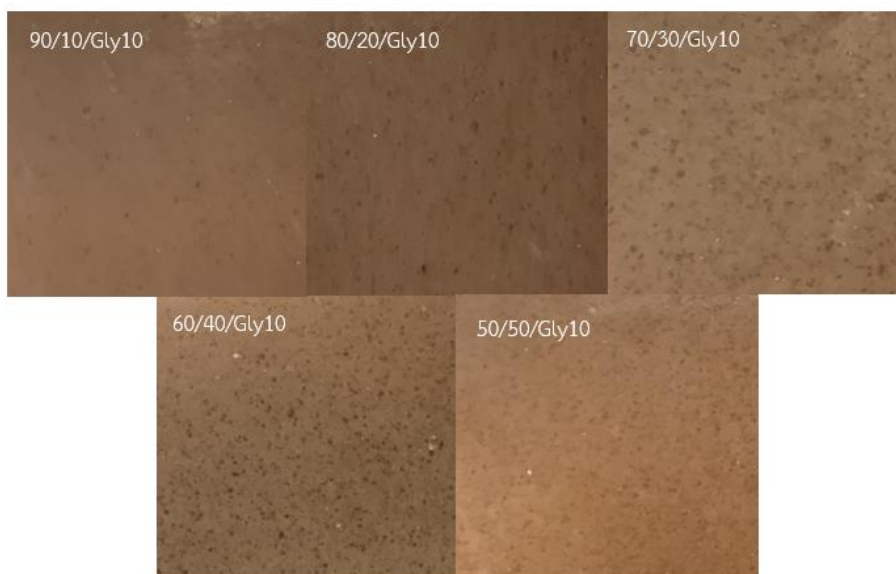
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะปรากฏของแผ่นฟิล์ม (film appearance) ด้วยกล้องถ่ายรูปของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง (NR/PS) ซึ่งเตรียมโดยเทคนิค latex mixing ที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ตามลำดับ เมื่อมองด้วยตาเปล่า พบว่าแผ่นยางฟิล์มที่ได้มีพื้นสีน้ำตาล แต่เมื่อเติมแป้งมันฝรั่งลงไป จะเริ่มสังเกตเห็นจุดสีน้ำตาลได้มากขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีการแยกเฟสระหว่างยางธรรมชาติกับแป้งมันฝรั่งอย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากความมีขั้วที่ต่างกันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด และสีน้ำตาลเข้มอาจเกิดจากแป้งที่ได้รับความร้อนเป็นเวลานาน แต่ไม่สามารถหลอมเหลวได้เนื่องจากมีจำนวนพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่สูงมาก ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีขณะที่ทำการให้ความร้อนขึ้นตัวอย่างเพื่อทำให้ยางสุก นอกจากนี้เมื่อทำการสัมผัสแผ่นฟิล์มพบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นและมีลักษณะเหนียวมากที่สุด รองลงมาคือแผ่นฟิล์ม 90/10 และ 80/20 ซึ่งยังมีลักษณะเหนียว ยืดหยุ่นได้ดี เนื่องจากมียางธรรมชาติที่มีลักษณะอ่อนนุ่มและยืดหยุ่นได้ดีเป็นเฟสหลักอยู่ แต่เมื่อปริมาณแป้งมันฝรั่งเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 30 – 50 %w/w พบว่า

แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะแข็งมากขึ้น โดยที่อัตราส่วน 50/50 ชิ้นงานจะมีลักษณะแข็งมากที่สุด เนื่องจากแป้งมันฝรั่งเป็นเฟสแข็งส่งผลให้แผ่นฟิล์มมีลักษณะแข็งและยืดหยุ่นน้อยลงเมื่อปริมาณแป้งมันฝรั่งมากขึ้น



รูปที่ 4.1 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง (NR/PS) ที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing

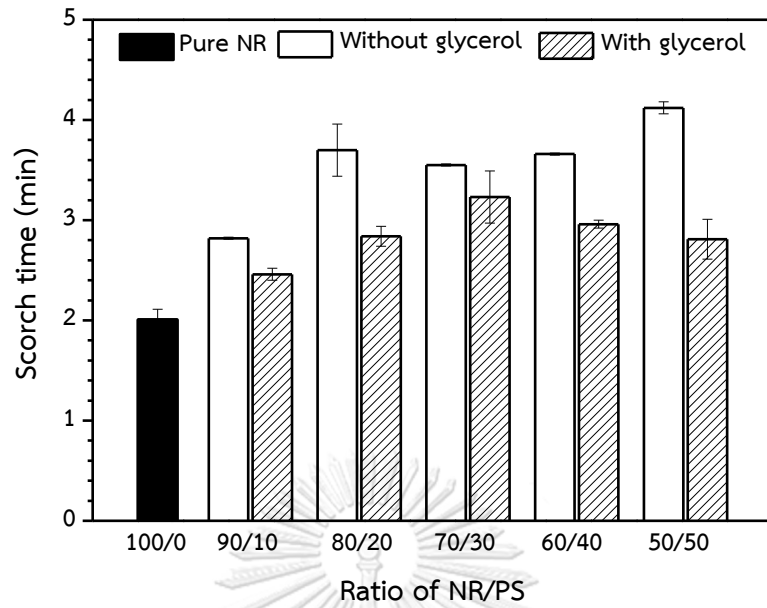
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะปรากฏของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อมีการเติมกลีเซอรอล (NR/PS/Gly10) เมื่อมองด้วยตาเปล่าจากรูปจะเห็นว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมกลีเซอรอลมีจุดสีน้ำตาลเข้มที่มาจากแป้งมันฝรั่ง เมื่อได้รับความร้อนลดลง เนื่องจากการเติมกลีเซอรอลช่วยลดการเกาะกลุ่มกันของแป้งมันฝรั่ง โดยการทำปฏิกิริยากับแป้งมันฝรั่งผ่านพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอลและหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันฝรั่ง ทำให้ลดการเกาะกลุ่มกันของแป้งมันฝรั่ง [46] อีกทั้งเปลี่ยนแป้งมันฝรั่งให้เป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชซึ่งลดการไหม้ของแป้งมันฝรั่งได้



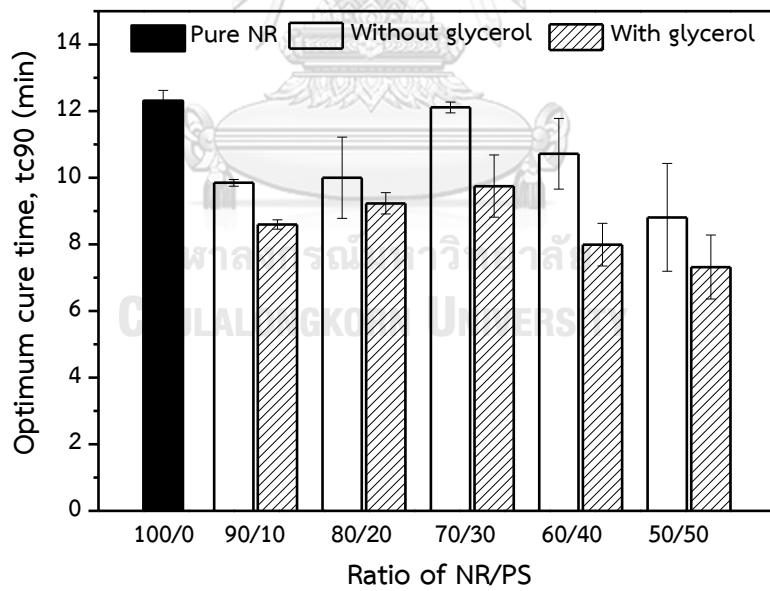
รูปที่ 4.2 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมกลีเซอรอล (NR/PS/Gly10) และเตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing

#### 4.1.2 ลักษณะการคงรูปของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing

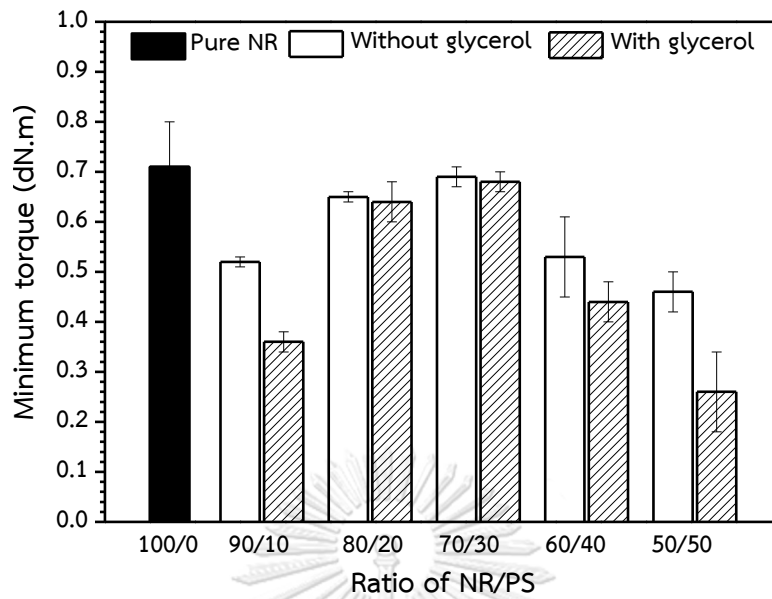
สมบัติการคงรูปของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล จากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing ที่ได้จากเครื่องทดสอบหาเวลาในการคงรูป (moving die rheometer; MDR) ที่อุณหภูมิ 155 °C แสดงในรูปที่ 4.3 ถึง 4.7 ซึ่งประกอบด้วย เวลาก่อนการคงรูปหรือเวลาสกอร์ท (scorch time,  $t_{s2}$ ) เวลาในการคงรูป (cure time,  $t_{c90}$ ) ค่าแรงบิดต่ำสุด (minimum torque,  $M_L$ ) แรงบิดสูงสุด (maximum torque,  $M_H$ ) และผลต่างของแรงบิด (delta torque,  $M_H - M_L$ )



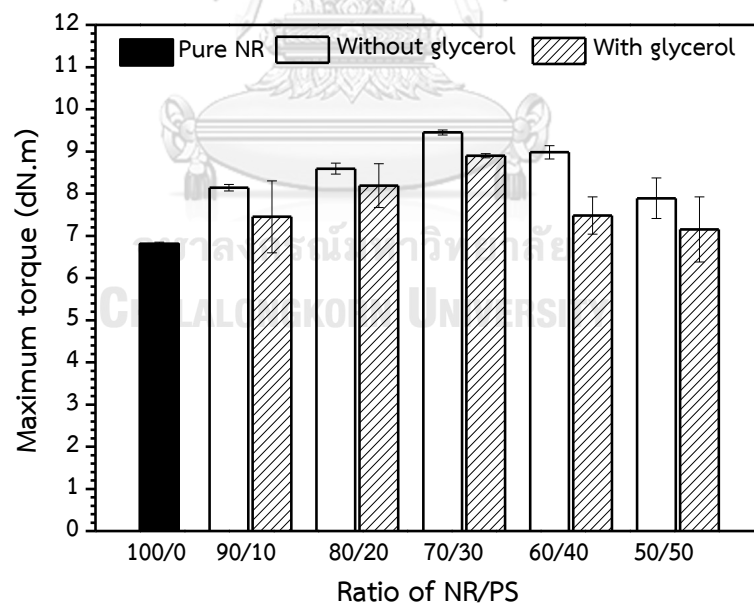
รูปที่ 4.3 เวลาก่อนการคงรูปของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing



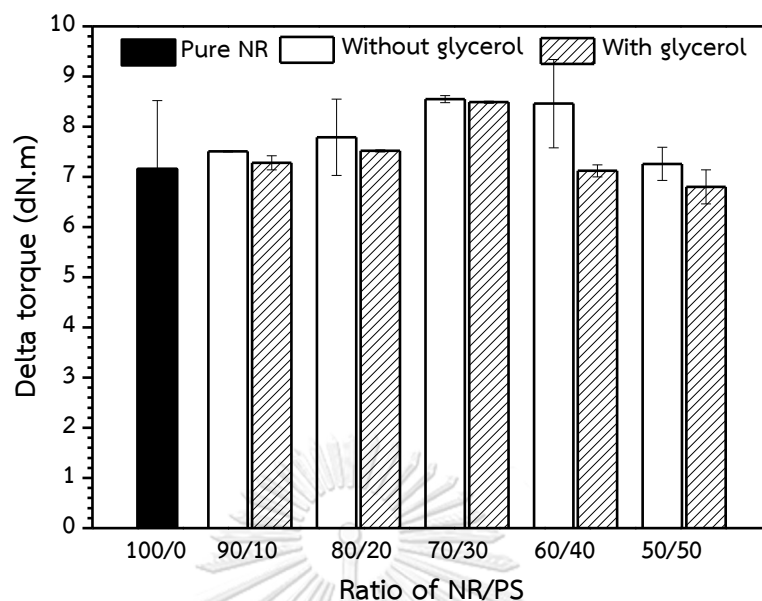
รูปที่ 4.4 เวลาในการคงรูปของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing



รูปที่ 4.5 ค่าแรงบิดต่ำสุดของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing



รูปที่ 4.6 ค่าแรงบิดสูงสุดของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing



รูปที่ 4.7 ค่าผลต่างแรงบิดของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลของการเติมแป้งมันฝรั่งต่อเวลาก่อนการคงรูปและเวลาในการคงรูปที่ 90 % ของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล ในเบื้องต้นจะเห็นว่าคอมพาว์นยางธรรมชาติที่มีการเติมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลมีเวลาก่อนการคงรูปที่นานกว่าคอมพาว์นยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมแป้งมันฝรั่งเลย ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันฝรั่งซึ่งเป็นหมู่ที่มีความว่องไวสามารถดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป (accelerator) และ ZnO ซึ่งเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป (activator) เข้าไป ทำให้การคงรูปเกิดได้ช้าลง ซึ่งลักษณะข้างต้นก็พบในกรณีที่มีการเติมซิลิกา ซึ่งในกรณีของซิลิกาเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากบนพื้นผิว [47] อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติมกลีเซอรอลพบว่าเวลาก่อนการคงรูปของยางคอมพาว์นสั้นลงแต่ยังคงนานกว่ากรณีที่ไม่มีการเติมแป้งมันฝรั่งเลย ทั้งนี้เป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอลเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันฝรั่ง ส่งผลให้แป้งมันฝรั่งเหลือหมู่ไฮดรอกซิลที่ไปจับกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูปและ ZnO ลดน้อยลง



เมื่อพิจารณาค่าเวลาในการคงรูปที่ 90 % พบว่าคอมพาว์นยางธรรมชาติที่มีการเติมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลมีค่าเวลาในการคงรูปที่ 90 % สั้นกว่าคอมพาว์นยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมแป้งมันฝรั่งเลย และเมื่อมีการเติมกลีเซอรอล พบว่ายางคอมพาว์นที่ได้มีเวลาในการคงรูปที่ 90 % ที่สั้นกว่ายางคอมพาว์นที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอล ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการเติมกลีเซอรอลน่าจะช่วยลดการดูดซับสารคงรูปของแป้ง ทำให้เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปสั้นลง อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถอธิบายได้ว่า เหตุใดการเติมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลจึงทำให้คอมพาว์นเกิดการคงรูปได้เร็วขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าแรงบิดต่ำสุดซึ่งบ่งชี้ถึงค่าความเหนียวของยางคอมพาว์นในรูปที่ 4.5 พบว่าคอมพาว์นยางธรรมชาติที่มีการเติมแป้งมันฝรั่งที่ทุกอัตราส่วนทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลมีค่าแรงบิดต่ำสุดน้อยกว่าคอมพาว์นยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมแป้งมันฝรั่งเลย โดยค่าแรงบิดต่ำสุดเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันฝรั่งที่เติมในช่วงต้นจนถึงที่อัตราส่วน 70/30 จากนั้นเริ่มลดลง การที่ค่าแรงบิดต่ำสุดหรือค่าความเหนียวของคอมพาว์นลดลงอาจเนื่องมาจาก การแทรกตัวของแป้งมันฝรั่งในเนื้อยาง ทำให้เฟสของยางธรรมชาติไม่ต่อเนื่อง อีกทั้งพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน ทำให้ค่าความเหนียวของคอมพาว์นลดลง แต่ถ้าเพิ่มปริมาณแป้งไม่เกิน 30 ค่าแรงบิดต่ำสุดหรือค่าความเหนียวของคอมพาว์นเพิ่มขึ้น [48] เนื่องจากแป้งมันฝรั่งที่เติมเพิ่มขึ้นเริ่มขัดขวางการเคลื่อนที่ของยางธรรมชาติแทน อย่างไรก็ตามค่าแรงบิดต่ำสุดหรือค่าความเหนียวของคอมพาว์นลดลงอีกครั้งหากเพิ่มสัดส่วนของแป้งมันฝรั่งเป็น 40 และ 50 ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมันฝรั่งเริ่มเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเมื่อถูกแรงกระทำก็แตกออกได้ง่ายคล้ายกับมีกลุ่มของพลาสติกไฮเซอร้ออยู่ในเนื้อยางทำให้ค่าแรงบิดต่ำหรือความเหนียวลดลง เมื่อพิจารณาผลของการเติมกลีเซอรอลจะเห็นว่า เมื่อมีการเติมกลีเซอรอลส่งผลทำให้ค่าแรงบิดต่ำสุดของคอมพาว์นยางธรรมชาติที่มีการเติมแป้งมันฝรั่งที่ทุกอัตราส่วนต่ำลง ซึ่งการเติมกลีเซอรอลช่วยลดการเกาะกลุ่มกันของแป้งมันฝรั่ง ทำให้แป้งมันฝรั่งกระจายตัวในยางได้ดีมากขึ้น ซึ่งนอกจากนี้กลีเซอรอลที่แทรกอยู่ในเนื้อแป้ง ยังส่งผลทำให้แป้งเคลื่อนที่ได้ง่าย ทำให้เวลาที่ให้แรงกับคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันที่มีการเติมกลีเซอรอลเคลื่อนที่ตามแนวแรงที่กระทำได้ง่าย คอมพาว์นจึงมีค่าแรงบิดต่ำสุดลดลง

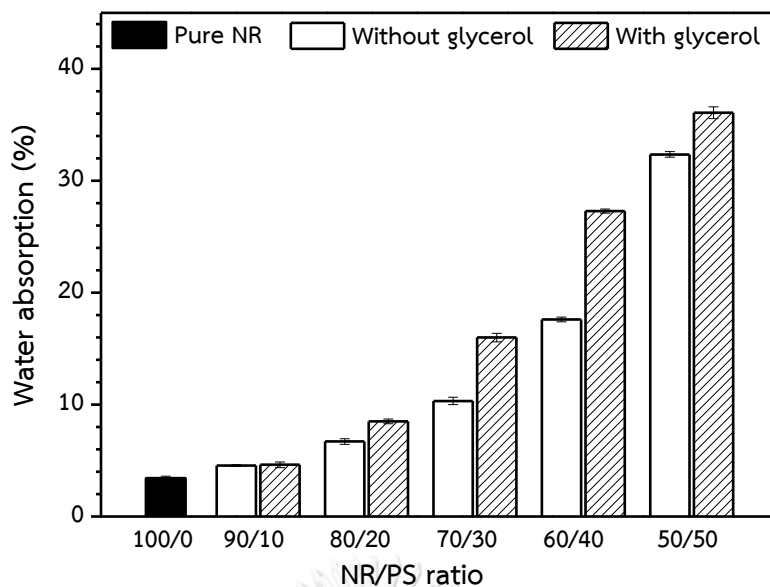
สำหรับอิทธิพลของแป้งมันฝรั่งต่อค่าแรงบิดสูงสุดซึ่งบ่งชี้ถึงปริมาณการคงรูปหรือความต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า การเติมแป้งมันฝรั่งส่งผลทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดของยางธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากแป้งมันฝรั่งมีความแข็งสูงกว่ายางธรรมชาติ เมื่อเติมลงในยางธรรมชาติจึงส่งผลให้คอมพาว์นมีค่าแรงบิดสูงสุดเพิ่มมากขึ้น [49] แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมากกว่า 30 เป็น 40 และ 50 จะเห็นว่าค่าแรงบิดสูงสุดเริ่มลดลง เนื่องจากที่สัดส่วนดังกล่าวแป้งมันฝรั่งมีการเกาะกลุ่มกันมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดจากการแตกออกจากกันของแป้งมันฝรั่ง ซึ่งใช้แรงน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางธรรมชาติคงรูป เมื่อมีการเติมกลีเซอรอลส่งผลทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดของคอมพาว์นยางธรรมชาติที่มีการเติมแป้งมันฝรั่งที่ทุกอัตราส่วนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการเติมกลีเซอรอลช่วยลดการเกาะกลุ่มกันของแป้งมันฝรั่ง ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งเพิ่มมากขึ้นที่ทุกอัตราส่วน

รูปที่ 4.7 แสดงค่าผลต่างแรงบิดของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล ซึ่งโดยภาพรวมจะเห็นว่าในกรณีที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอลค่าผลต่างแรงบิดของคอมพาว์นยางธรรมชาติที่มีการเติมแป้งมันฝรั่งที่ทุกอัตราส่วนแตกต่างจากคอมพาว์นยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมแป้งมันฝรั่งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ถึงแม้ว่ามีการเติมแป้งมันฝรั่งซึ่งมีความแข็งมากกว่ายางธรรมชาติแต่ไม่ได้ส่งผลทำให้ค่าผลต่างแรงบิดเพิ่มขึ้นจากเดิม เนื่องจากการเติมแป้งมันฝรั่งทำให้การคงรูปเกิดได้น้อยลงเนื่องจากการดูดซับสารคงรูปดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น แต่เมื่อมีการเติมกลีเซอรอลลงไป ค่าผลต่างแรงบิดของคอมพาว์นยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ทุกอัตราส่วนสูงกว่าคอมพาว์นยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมแป้งมันฝรั่ง เนื่องจากกลีเซอรอลลดการดูดซับสารคงรูป ดังนั้นการเติมแป้งมันฝรั่งซึ่งมีความแข็งมากกว่ายางธรรมชาติจึงส่งผลให้ผลต่างแรงบิดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอมพาว์นที่ไม่ได้เติมแป้งมันฝรั่งเลย

### 4.1.3 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิค

#### การผสมแบบ latex mixing

รูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.1 แสดงความสามารถในการดูดซับน้ำ (%water absorption) ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ทั้งที่เติมและไม่เติม กลีเซอรอล ในเบื้องต้นจะเห็นว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำและมีค่าอยู่ที่  $3.41 \pm 0.19\%$  ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของยางธรรมชาติประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนเท่านั้น ทำให้มีสภาพขั้วต่ามากจึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำ เมื่อมีการเติมแป้งมันฝรั่งพบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูงเพิ่มขึ้น และค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันฝรั่ง ทั้งนี้เนื่องมาจากแป้งมันฝรั่งมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำเป็นจำนวนมาก ทำให้แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น [50] นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมกลีเซอรอลมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมากกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอล เนื่องจากกลีเซอรอลซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ให้กับแป้งมันฝรั่งตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นนั้น ทำให้แป้งมันฝรั่งไม่เกาะกลุ่ม โมเลกุลของน้ำจึงสามารถผ่านเข้าไปได้มากขึ้น อีกทั้งกลีเซอรอลเองก็มีหมู่ไฮดรอกซิลด้วยจึงช่วยเสริมให้แผ่นฟิล์มสามารถดูดซับน้ำได้มากยิ่งขึ้น [51] แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 50/50/Gly10 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูงสุดที่  $36.08 \pm 0.52\%$



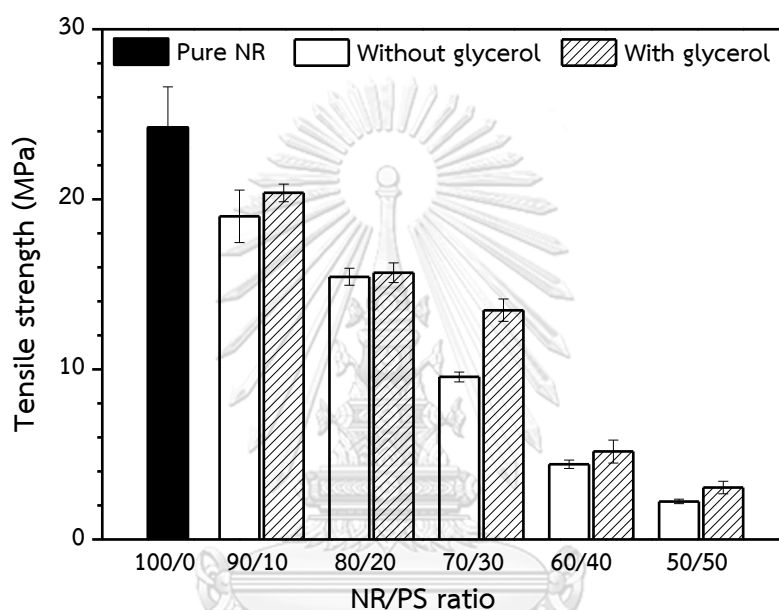
รูปที่ 4.8 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing

ตารางที่ 4.1 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing

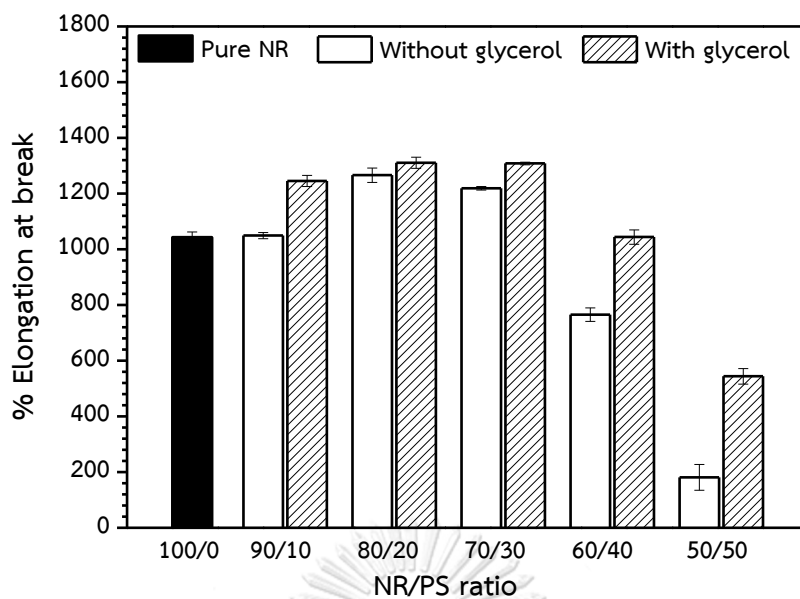
NR/PS	water absorption (%)
100/0	3.41 ± 0.19
90/10	4.55 ± 0.08
80/20	6.70 ± 0.24
70/30	10.32 ± 0.33
60/40	17.61 ± 0.21
50/50	32.35 ± 0.25
90/10/Gly10	4.62 ± 0.26
80/20/Gly10	8.50 ± 0.21
70/30/Gly10	15.99 ± 0.39
60/40/Gly10	27.29 ± 0.18
50/50/Gly10	36.08 ± 0.52

#### 4.1.4 สมบัติความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง จากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing

ค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%elongation at break) ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.9 ค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing



รูปที่ 4.10 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing

ตารางที่ 4.2 สมบัติความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing

NR/PS	tensile strength (MPa)	elongation at break (%)
100/0	24.23 ± 2.39	1043 ± 19
90/10	19.00 ± 1.55	1049 ± 11
80/20	15.44 ± 0.50	1266 ± 26
70/30	9.56 ± 0.29	1219 ± 6
60/40	4.42 ± 0.24	765 ± 24
50/50	2.23 ± 0.13	181 ± 46
90/10/Gly10	20.38 ± 0.52	1245 ± 20
80/20/Gly10	15.69 ± 0.58	1311 ± 20
70/30/Gly10	13.48 ± 0.66	1308 ± 5
60/40/Gly10	5.17 ± 0.68	1040 ± 26
50/50/Gly10	3.05 ± 0.37	544 ± 28

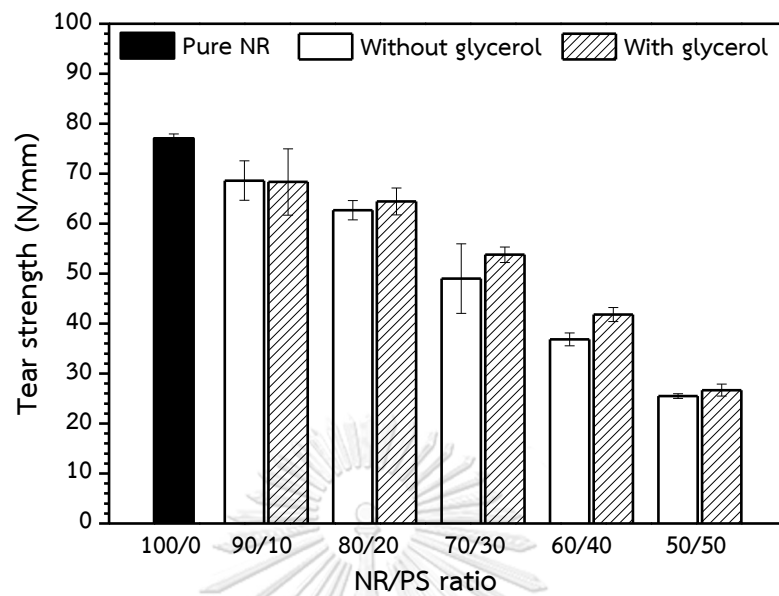
จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.2 พบว่าในกรณีของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมแป้งมันฝรั่งมีค่าความทนต่อแรงดึงอยู่ที่  $24.23 \pm 2.39$  MPa แต่เมื่อมีการเติมแป้งมันฝรั่งลงไป พบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลมีค่าความทนต่อแรงดึงลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณแป้งมันฝรั่งที่เพิ่มขึ้น [39] ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากความเข้ากันไม่ได้ของแป้งมันฝรั่งกับยางธรรมชาติเนื่องจากมีสภาพขั้วที่แตกต่างกันมาก อีกทั้งแป้งมันฝรั่งก็มีการรวมตัวกัน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อมีการเติมกลีเซอรอล แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ทุกอัตราส่วนมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่าที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอล เนื่องจากกลีเซอรอลเข้าไปช่วยลดการเกาะกลุ่มของแป้ง ทำให้แอกโกโมเลตของแป้งมันฝรั่งมีขนาดที่เล็กลง การกระจายตัวในเนื้อยางธรรมชาติเกิดได้ดีขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มที่ได้เพิ่มสูงขึ้น

รูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.2 พบว่า ที่อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อแป้งมันฝรั่งที่ 90/10, 80/20 และ 70/30 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด สูงกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมแป้งมันฝรั่ง โดยที่อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อแป้งมันฝรั่งที่ 80/20 เป็นอัตราส่วนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุดอยู่ที่  $1266 \pm 26$  และ  $1311 \pm 20\%$  ในกรณีที่ไม่มีการเติมและที่มีการเติมกลีเซอรอลตามลำดับ อีกทั้งจากจุดนี้เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งมันฝรั่งพบว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด เริ่มลดลง และที่อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ต่ำกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมแป้งมันฝรั่งอีกด้วย โดยแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 50/50 ทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด เพียง  $181 \pm 46$  และ  $544 \pm 28\%$  ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ทุกอัตราส่วนเมื่อมีการเติมกลีเซอรอลมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด สูงกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอล ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลสามารถเข้าไปขัดขวางการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของแป้งมันฝรั่งทำให้แป้งมีความยืดหยุ่นสูงขึ้นเมื่อเติมลงในยางธรรมชาติจึงทำให้แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมกลีเซอรอลมีความสามารถในการยืดตัวได้มากยิ่งขึ้น

#### 4.1.5 สมบัติความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing

รูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงสุดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล จากผลการทดลองจะเห็นว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติมีความต้านทานการฉีกขาดสูงที่สุดอยู่ที่  $77.10 \pm 0.86$  N/mm เมื่อมีการเติมแป้งมันฝรั่งลงในยางธรรมชาติทำให้ได้แผ่นฟิล์มที่มีความต้านทานการฉีกขาดลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาณแป้งมันฝรั่งที่เพิ่มมากขึ้น [39] โดยที่อัตราส่วน 50/50 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งมีค่าความต้านทานการฉีกขาดอยู่ที่  $25.52 \pm 0.47$  และ  $26.69 \pm 1.19$  N/mm ในกรณีที่ไม่เติมและที่เติมกลีเซอรอล ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุเนื่องมาจากแป้งมันฝรั่งมีสภาพขี้สูงในขณะที่ยางธรรมชาติมีสภาพขี้ต่ำซึ่งจากลักษณะสภาพขี้ที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก เกิดความไม่เข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดส่งผลให้รอยต่อระหว่างผิวของพอลิเมอร์ดังกล่าวไม่แข็งแรง การขยายตัวของรอยฉีกขาดในชั้นตัวอย่างจึงเกิดได้ง่ายอีกทั้งแป้งยังมีการรวมกลุ่มกันทำให้เกิดเป็นจุดอ่อนในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามการเติมกลีเซอรอลช่วยทำให้แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งมีค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งทั้งนี้ก็เนื่องมาจากหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอลเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันฝรั่งผ่านพันธะไฮโดรเจน ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งมันฝรั่งลดลง การเกาะกลุ่มกันของแป้งในเนื้อยางธรรมชาติลดลงซึ่งเป็นผลให้แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมกลีเซอรอลมีค่าความทนต่อการฉีกขาดสูงกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอลดังแสดงในรูปที่ 4.11





รูปที่ 4.11 สมบัติความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing

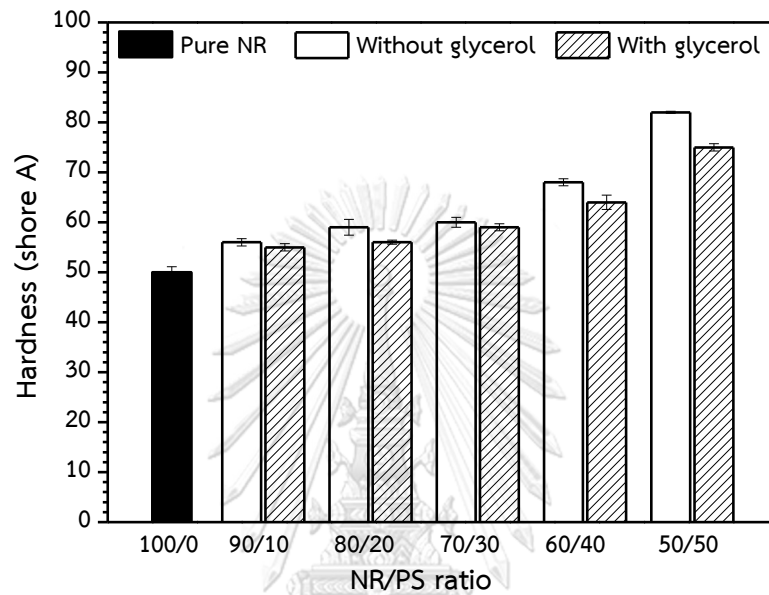
**ตารางที่ 4.3** สมบัติความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing

NR/PS	tear strength (N/mm)
100/0	77.10 ± 0.86
90/10	68.62 ± 3.94
80/20	62.70 ± 1.94
70/30	49.02 ± 6.96
60/40	36.83 ± 1.30
50/50	25.52 ± 0.47
90/10/Gly10	68.34 ± 6.62
80/20/Gly10	64.44 ± 2.70
70/30/Gly10	53.79 ± 1.56
60/40/Gly10	41.81 ± 1.41
50/50/Gly10	26.69 ± 1.19

#### 4.1.6 สมบัติความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing

รูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.4 แสดงค่าความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล พบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติมีค่าความแข็งต่ำสุดอยู่ที่  $50 \pm 1.14$  shore A เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง จึงมีความยืดหยุ่นสูงอีกทั้งยังอ่อนนุ่มเมื่อไม่มีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงใดๆ จึงมีค่าความแข็งค่อนข้างต่ำ เมื่อมีการเติมแป้งมันฝรั่งซึ่งเป็นวัสดุที่มีความเป็นผลึกสูง จึงส่งผลทำให้แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีการเติมแป้งมันฝรั่งมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันฝรั่ง ค่าความแข็งของแผ่นฟิล์มที่ได้ก็ยิ่งเพิ่มขึ้น โดยแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 50/50 มีค่าความแข็ง  $82 \pm 0.20$  และ  $75 \pm 0.71$  shore A ในกรณีที่ไม่เติมและที่เติมกลีเซอรอล ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของการ

เติมกลีเซอรอลต่อค่าความแข็งของแผ่นฟิล์ม จะเห็นว่าการเติมกลีเซอรอลส่งผลทำให้ค่าความแข็งของแผ่นฟิล์มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลสามารถเข้าไปขัดขวางการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของแป้งมันฝรั่งทำให้ปริมาณผลึกของแป้งมันฝรั่งลดลง จึงทำให้ค่าความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมกลีเซอรอลลดลง



รูปที่ 4.12 สมบัติความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียม

ด้วยกระบวนการ latex mixing

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

**ตารางที่ 4.4** สมบัติความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing

NR/PS	hardness (shore A)
100/0	50 ± 1.14
90/10	56 ± 0.71
80/20	59 ± 1.58
70/30	60 ± 1.00
60/40	68 ± 0.71
50/50	82 ± 0.20
90/10/Gly10	55 ± 0.71
80/20/Gly10	56 ± 0.41
70/30/Gly10	59 ± 0.71
60/40/Gly10	64 ± 1.41
50/50/Gly10	75 ± 0.71

#### 4.1.7 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing

ตารางที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 จากผลการทดลองพบว่าช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติและของแป้งมันฝรั่งอยู่ที่ 353.76 - 402.78 และ 288.70 - 315.94 °C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิที่ยางธรรมชาติเริ่มสลายตัวหรือ  $T_{onset}$  มีค่าสูงกว่า  $T_{onset}$  ของแป้งมันฝรั่ง สำหรับแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งในกรณีที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอล พบว่าที่ทุกอัตราส่วน แป้งมันฝรั่งที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อยางธรรมชาติเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลงซึ่งหมายความว่าแป้งมันฝรั่งสลายตัวทางความร้อนง่ายขึ้นหรืออาจกล่าวได้ว่าแป้งมันฝรั่งมีเสถียรภาพทางความร้อนลดลงเมื่อกระจายตัวในเนื้อยางธรรมชาติเทียบกับแผ่นฟิล์มแป้งมันฝรั่งบริสุทธิ์ ซึ่งสาเหตุเนื่องมาจากแป้งมันฝรั่งเมื่อเติมลงในยางธรรมชาติจะประพฤติตัวเป็นเฟสที่

กระจายอยู่ในเนื้อยางธรรมชาติ แต่เนื่องจากสภาพขั้วที่ต่างกันมากทำให้ยางธรรมชาติกับแป้งมันฝรั่งไม่สามารถสร้างอันตรกิริยาต่อกันได้ เมื่อแป้งมันฝรั่งอยู่ในลักษณะที่เป็นกลุ่มขนาดเล็กเทียบกับแผ่นฟิล์มแป้งมันฝรั่งบริสุทธิ์อีกทั้งไม่มีอันตรกิริยากับเฟสต่อเนื่องหรือเฟสหลักจึงทำให้เกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิตำลงนั่นเอง สำหรับแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ พบว่าการเติมแป้งมันฝรั่งไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามยกเว้นแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 50/50 ทั้งนี้เนื่องมาจากยางธรรมชาติยังคงประพฤติตัวเป็นเฟสต่อเนื่องถึงแม้จะมีการเติมแป้งมันฝรั่งลงไป แต่ที่อัตราส่วน 50/50 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติในแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้นประมาณ 10 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากแป้งมันฝรั่งที่อยู่ในเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์ผสมซึ่งเกิดการสลายตัวเป็นชาร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเมื่อเติมในปริมาณมากชาร์ที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่คล้ายชั้นป้องกันให้กับยางธรรมชาติ ส่งผลให้ยางธรรมชาติในแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.5



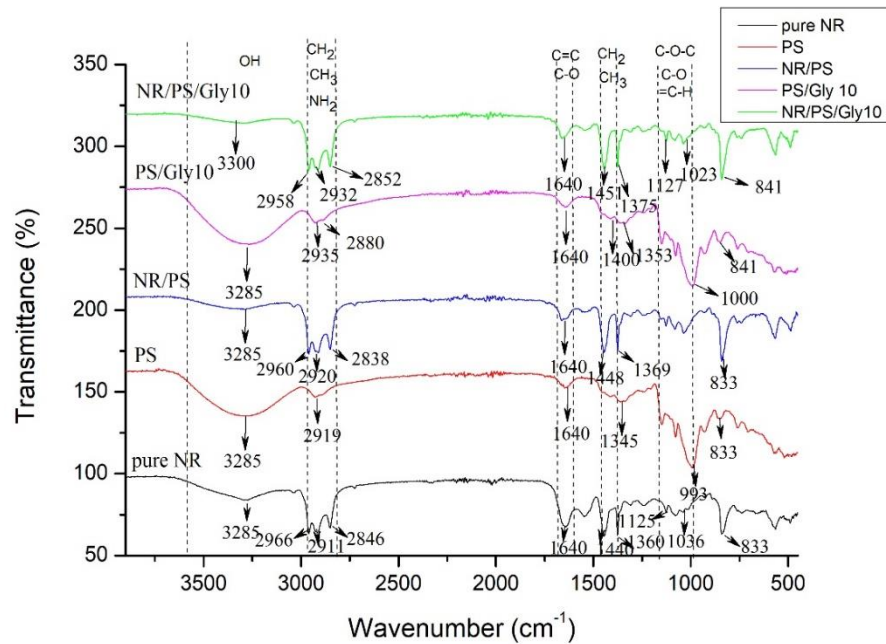
**ตารางที่ 4.5** อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing

NR/PS	onset temperature of mass loss (°C)		endset temperature of mass loss (°C)	
	1 st peak	2 nd peak	1 st peak	2 nd peak
100/0	353.76		402.78	
90/10	274.07	357.27	296.71	401.88
80/20	264.98	357.76	297.99	402.23
70/30	273.80	357.53	301.02	402.73
60/40	277.50	358.81	304.65	401.20
50/50	278.31	361.31	313.95	400.19
90/10/Gly10	277.70	341.03	313.35	413.04
80/20/Gly10	274.41	343.26	327.26	411.47
70/30/Gly10	271.51	357.41	307.33	407.68
60/40/Gly10	273.55	343.31	328.17	409.55
50/50/Gly10	273.25	345.66	334.12	409.82
0/100	288.70		315.94	

สำหรับในกรณีของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมกลีเซอรอลพบว่าที่ทุกอัตราส่วน แป้งมันฝรั่งที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อยางธรรมชาติเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง เช่นเดียวกับกับกรณีที่ไม่ได้เติมกลีเซอรอล โดยจะอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิ 277.70 ถึง 271.51 °C ต่ำกว่าสำหรับการสลายตัวของยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ผสมพบที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่ายางธรรมชาติบริสุทธิ์เกือบทุกอัตราส่วนยกเว้น 70/30/Gly10 แต่อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอลโดยสิ้นเชิง

#### 4.1.8 การวิเคราะห์โครงสร้างเคมีแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจาก เทคนิคการผสมแบบ latex mixing

รูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ แผ่นฟิล์มแป้งมันฝรั่งและแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลด้วยเทคนิค ATR-FTIR ในช่วงความถี่คลื่น 4000 - 700  $\text{cm}^{-1}$



รูปที่ 4.13 วิเคราะห์โครงสร้างเคมีด้วยเทคนิค ATR- FTIR ของ NR, PS, NR/PS, PS/Gly10

ตารางที่ 4.6 โครงสร้างทางเคมีของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ แผ่นฟิล์มแป้งมันฝรั่ง และแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล ด้วยเทคนิค ATR-FTIR

ATR-FTIR spectrum		
ตำแหน่งเลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )		หมู่ฟังก์ชัน
พีกอ้างอิง*	พีกที่สังเกตได้	
2960	2958	C-H stretching of CH <sub>3</sub>
2925	2920	C-H stretching of CH <sub>2</sub>
1440	1448	C-H bending of CH <sub>2</sub>
1375	1375	C-H bending of CH <sub>3</sub>
835	833	-C=C ( <i>cis</i> 1,4)
3000, 3279, 3440	3285	O-H stretching
860	841	C-O-C stretching

\* [50, 52, 53]

จากสเปกตรัมข้างต้น พบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ (NR) ปรากฏพีกการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3285 cm<sup>-1</sup> แสดงถึงการสั่นของ O-H stretching ถึงแม้ว่าโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยซ้ำ 1,4 ซิส พอลิไอโซพรีนก็ตาม แต่การปรากฏของพีกการสั่นของไฮดรอกซิลน่าจะมาจากความชื้นในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ [50] ในขณะที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2966 cm<sup>-1</sup> แสดงถึงการสั่นของ CH<sub>3</sub> stretching ตำแหน่งเลขคลื่น 2846 cm<sup>-1</sup> แสดงถึงการสั่นของ CH<sub>2</sub> stretching ตำแหน่งเลขคลื่น 1640 cm<sup>-1</sup> แสดงถึงการสั่นของ C=C stretching รวมทั้งตำแหน่งเลขคลื่น 1440, 1360, 1125 cm<sup>-1</sup> แสดงถึงการสั่นของ C-H bending ของ CH<sub>2</sub>, C-H bending ของ CH<sub>3</sub>, =C-H plane bending ของ ซิส-1-4 [52] และ 833 cm<sup>-1</sup> แสดงถึงแถบการสั่นของพันธะคู่คาร์บอนในสายโซ่หลักของยางธรรมชาติ

สำหรับแผ่นฟิล์มแป้งมันฝรั่ง (PS) การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3285 cm<sup>-1</sup> ซึ่งแสดงถึงการสั่น O-H stretching ตำแหน่งเลขคลื่น 2919 cm<sup>-1</sup> แสดงถึงการสั่น C-H stretching ของ CH<sub>2</sub> และตำแหน่งเลขคลื่น 1640 cm<sup>-1</sup> แสดงถึงแถบการสั่นของหมู่ C=O ของ chelate aldehyde



สำหรับแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง (NR/PS) พบว่าปรากฏตำแหน่งการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $3285\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการสั่นของ O-H stretching เช่นเดียวกับพีคที่ปรากฏในแผ่นฟิล์มแป้งมันฝรั่ง และพีคการดูดกลืนของหน่วยไอโซพรีน คือ C-H bending ของ  $\text{CH}_3$  และ =C-H bending คล้ายกับแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า ไม่เกิดการ shift ของพีคของยางธรรมชาติและพีคของแป้งมันฝรั่ง ในแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม บ่งชี้ได้ว่าพอลิเมอร์ทั้งสองไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน

สำหรับแผ่นฟิล์มแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมกลีเซอรอล (PS/Gly) พบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตำแหน่งเลขคลื่น  $3285\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการสั่น O-H stretching แต่พีคมีความเข้มพีคมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของกลีเซอรอลก็มีหมู่ไฮดรอกซิลเช่นกัน อีกทั้งพีคที่ได้มีความกว้างของพีคมากขึ้นเล็กน้อย อาจมีสาเหตุมาจากหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอลเข้าทำปฏิกิริยาผ่านพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันฝรั่ง ทำให้ลักษณะของพีคการสั่น O-H stretching มีลักษณะต่างไปจากของแผ่นฟิล์มแป้งมันฝรั่งเล็กน้อย

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมกลีเซอรอล (NR/PS/Gly10) พบว่าลักษณะของสเปกตรัมที่ได้มีความคล้ายคลึงกับสเปกตรัมของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง (NR/PS) โดยปรากฏพีคยางธรรมชาติที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่  $2958, 2932, 2852\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งตรงกับการสั่นแบบ stretching ของ OH,  $\text{NH}_2$  ที่เติมลงในน้ำยางธรรมชาติ และพันธะ  $\text{CH}_3$  stretching ตามลำดับ นอกจากนี้ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น  $1451, 1375$  และ  $1127\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง  $\text{CH}_2$  deformation,  $\text{CH}_3$  deformation, C-H in plane bending และ =C-H plane bending ของ cis-1, 4 ตามลำดับ [52-54] ช่วยยืนยันว่ามีโมเลกุลของ NR อยู่ในแผ่นฟิล์มดังกล่าวจริง

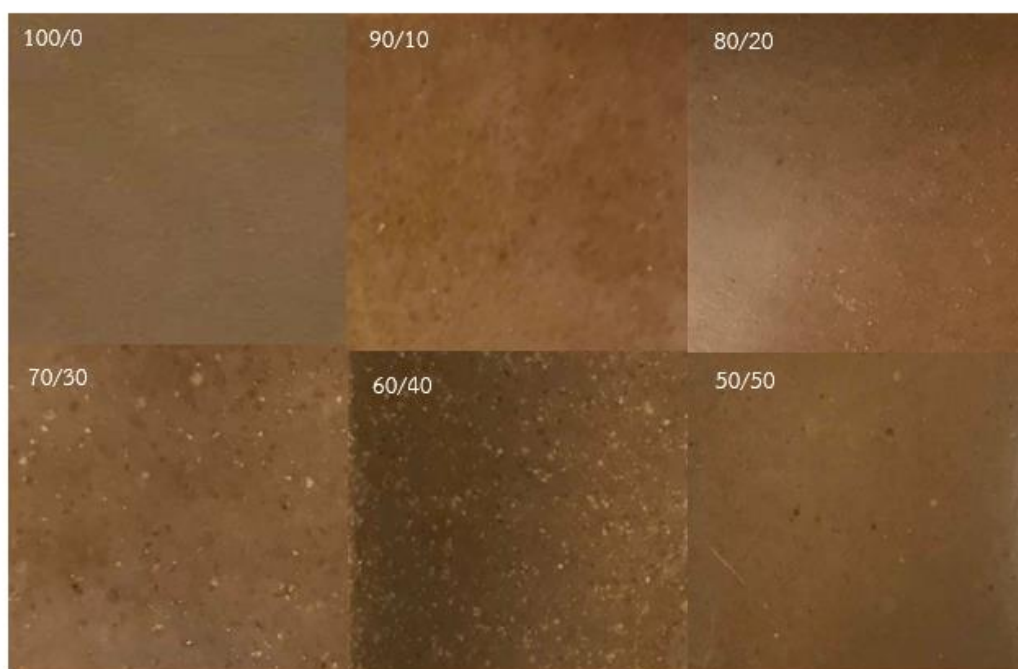
## 4.2 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing

### 4.2.1 สมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิค

#### การผสมแบบ dry mixing

รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะปรากฏของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง (NR/PS) ซึ่งเตรียมโดยเทคนิค dry mixing ที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 เมื่อมองด้วยตาเปล่า พบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ได้เริ่มเห็นเป็นจุดขาวๆ เพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณแป้งมันฝรั่งเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าที่อัตราส่วนที่อัตราส่วนยาง

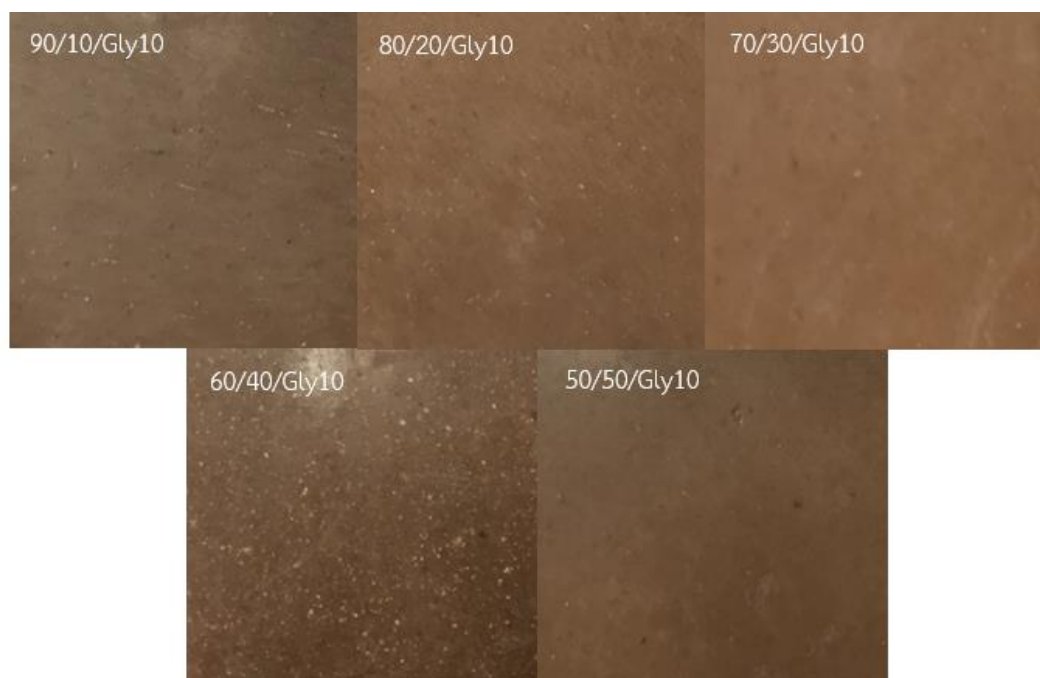
ธรรมชาติต่อแป้งมันฝรั่งที่ 50/50 แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะผิวที่เนียนขึ้น ซึ่งระหว่างที่ทำการผสม ผู้วิจัยพบว่า ของผสมมีลักษณะค่อนข้างนิ่มกว่าที่อัตราส่วนอื่น ไม่พบกว่าแยกเฟสของแป้งออกจากเนื้ออย่างเหมือนกับสูตรอื่น พอลิเมอร์ผสมที่ได้กลับมีเนื้อที่เนียนขึ้น การปรากฏของจุดต่างๆ กลับพบน้อยลงทั้งๆที่มีปริมาณแป้งมันฝรั่งมากขึ้นก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการผสมแบบ latex mixing พบว่า เทคนิคการผสมแบบ dry mixing ให้แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เห็นการแยกเฟสน้อยกว่า



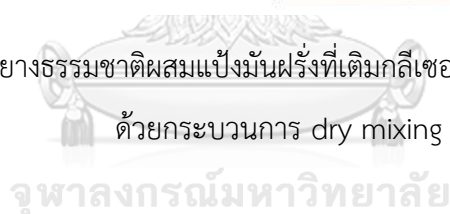
รูปที่ 4.14 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง (NR/PS) ที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing

รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะปรากฏของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมกลีเซอรอล (NR/PS/Gly10) ที่อัตราส่วนต่างๆ จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing เมื่อมองด้วยตาเปล่าจากรูปซึ่งจะเห็นว่าลักษณะของแผ่นฟิล์มมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับกรณีแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ไม่ได้เติมกลีเซอรอล กล่าวคือ แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ได้เริ่มเห็นเป็นจุดขาวๆ เพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณแป้งมันฝรั่งเพิ่มมากขึ้น แต่ที่อัตราส่วน 50/50 แผ่นฟิล์มที่ได้มีจุดลดลง ผิวหน้าดูเนียนและเรียกว่าที่แผ่นฟิล์มที่มีแป้งในสัดส่วนที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของแผ่นฟิล์มทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล พบว่าแผ่นฟิล์มที่มีการเติมกลีเซอรอลมีจุดบนผิวที่เกิดจากการรวมตัวกันของแป้งมันฝรั่งที่น้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสม

แป้งมันฝรั่งที่ได้จากเทคนิคการผสม dry mixing เกิดการแยกเฟสระหว่างยางธรรมชาติและแป้งมันฝรั่งน้อยกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ได้จากเทคนิคการผสม latex mixing



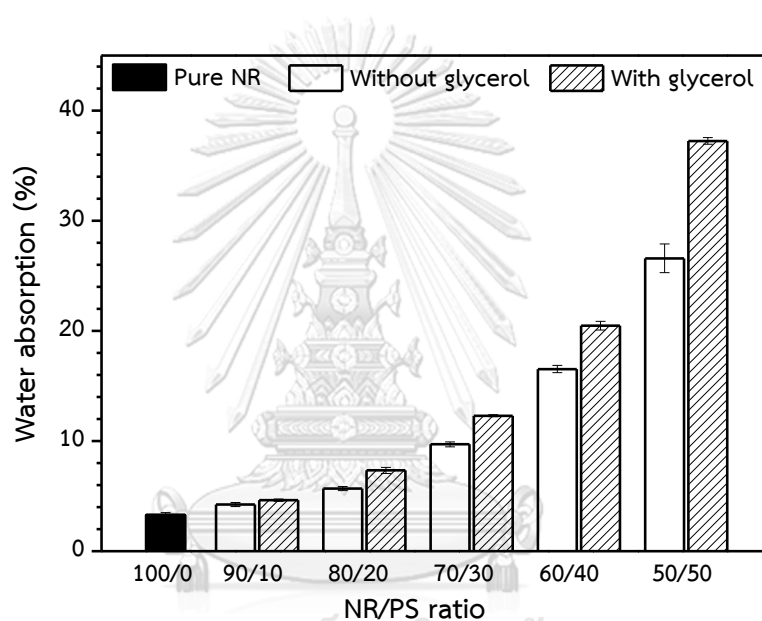
รูปที่ 4.15 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมกลีเซอรอล (NR/PS/Gly10) ที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing



#### 4.2.2 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing

รูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.7 แสดงความสามารถในการดูดซับน้ำ (% water absorption) ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วนต่างๆ กัน จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing ทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล ในเบื้องต้นจะเห็นว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำและมีค่าอยู่ที่  $3.28 \pm 0.21\%$  เมื่อทำการผสมแป้งมันฝรั่งลงในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ พบว่าแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่าการดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยค่าการดูดซับน้ำแปรผันตามปริมาณแป้งมันฝรั่งที่เติม และเมื่อมีการเติมกลีเซอรอลยิ่งทำให้ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาอิทธิพลของกระบวนการเตรียมต่อค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าในกรณีแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing มีค่าการดูดซับ

น้ำไม่ต่างจากที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing แต่เมื่อพิจารณาแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วนต่างๆ กลับพบว่า แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing มีค่าการดูดซับน้ำต่ำกว่าที่เตรียมจากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing ซึ่งคาดว่าอาจเนื่องมาจากกระบวนการที่ทำการผสมแบบ dry mixing มีการฟุ้งกระจายของแป้ง ทำให้ปริมาณแป้งมันฝรั่งในแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมน้อยกว่า ซึ่งจากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าการดูดซับน้ำแปรผันตามปริมาณแป้งมันฝรั่ง ดังนั้นค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing จึงมีค่าต่ำกว่าที่เตรียมได้จากการผสมแบบ latex mixing

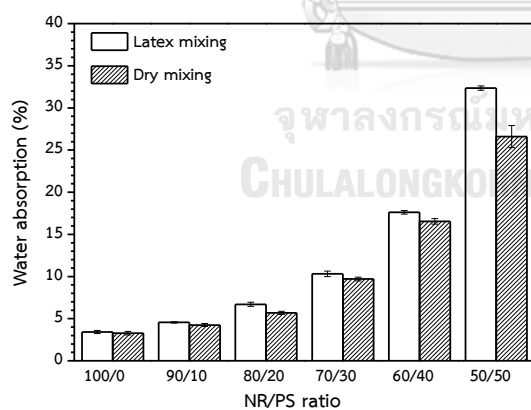


รูปที่ 4.16 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียม

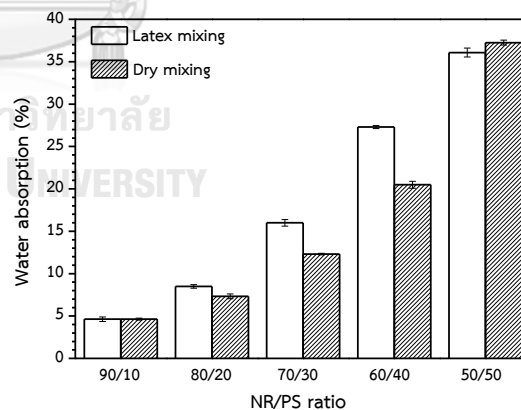
ด้วยกระบวนการ dry mixing

ตารางที่ 4.7 สมบัติการดูดซึมน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing

NR/PS	water absorption (%)
100/0	3.28 ± 0.21
90/10	4.24 ± 0.18
80/20	5.68 ± 0.19
70/30	9.70 ± 0.22
60/40	16.53 ± 0.33
50/50	26.59 ± 1.31
90/10/Gly10	4.63 ± 0.11
80/20/Gly10	7.33 ± 0.28
70/30/Gly10	12.30 ± 0.09
60/40/Gly10	20.48 ± 0.40
50/50/Gly10	37.25 ± 0.30



(ก)



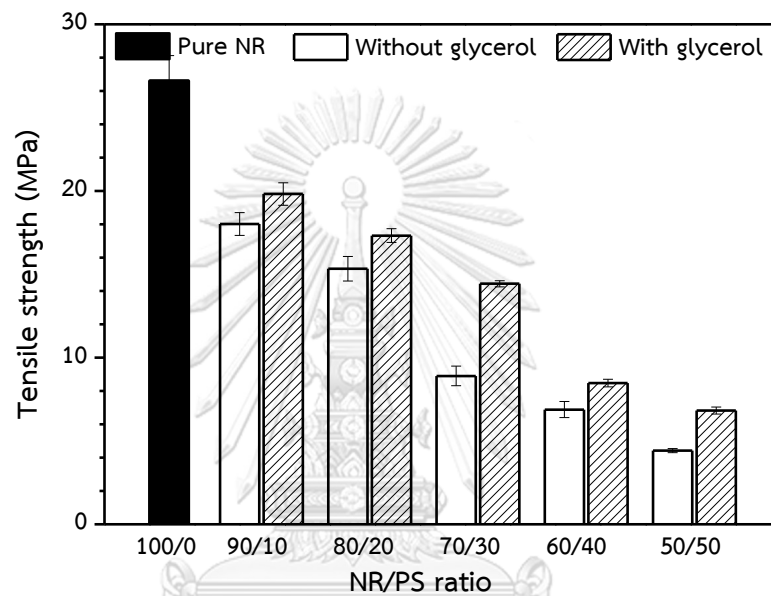
(ข)

รูปที่ 4.17 อิทธิพลของกระบวนการเตรียมต่อค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง ก) ไม่เติมกลีเซอรอล ข) เติมกลีเซอรอล

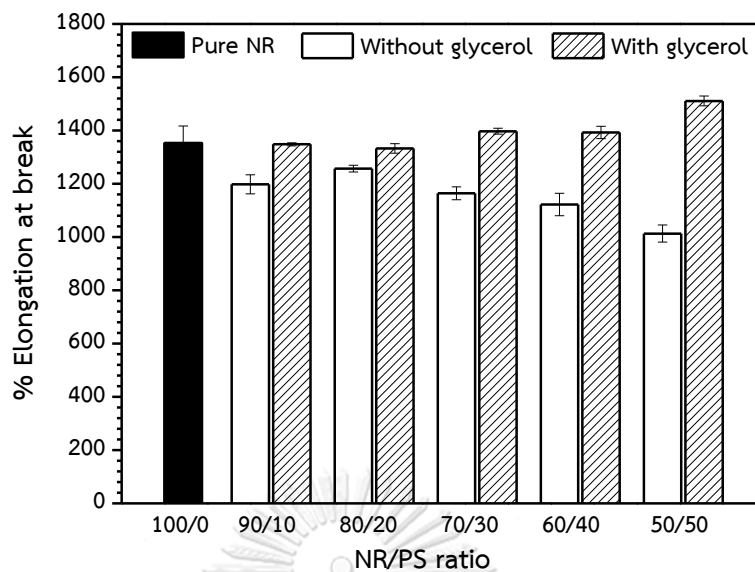
#### 4.2.3 สมบัติความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง

##### จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing

ค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (% elongation at break) ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing ทั้งที่เติมและไม่เติม กลีเซอรอล แสดงดังรูปที่ 4.18 - 4.19 และตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.18 ค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing



รูปที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing

ตารางที่ 4.8 สมบัติความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing

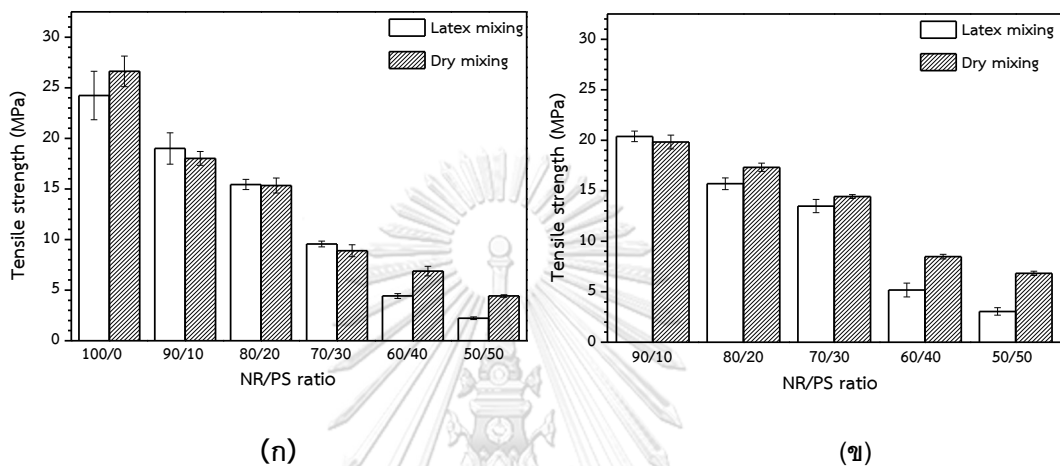
NR/PS	tensile strength (MPa)	elongation at break (%)
100/0	26.62 ± 1.51	1353 ± 64
90/10	18.02 ± 0.68	1198 ± 36
80/20	15.33 ± 0.74	1257 ± 13
70/30	8.90 ± 0.59	1164 ± 24
60/40	6.88 ± 0.48	1122 ± 42
50/50	4.42 ± 0.12	1013 ± 32
90/10/Gly10	19.82 ± 0.68	1348 ± 6
80/20/Gly10	17.32 ± 0.41	1333 ± 8
70/30/Gly10	14.43 ± 0.19	1397 ± 11
60/40/Gly10	8.48 ± 0.23	1393 ± 23
50/50/Gly10	6.83 ± 0.21	1511 ± 18

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.8 พบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมแป้งมันฝรั่งมีค่าความทนต่อแรงดึงอยู่ที่  $26.62 \pm 1.51$  MPa แต่เมื่อมีการเติมแป้งมันฝรั่งลงไป พบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลมีค่าความทนต่อแรงดึงลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณแป้งมันฝรั่งที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกรณีแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมเทคนิคการผสมแบบ latex mixing ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากความเข้ากันไม่ได้ของแป้งมันฝรั่งกับยางธรรมชาติเนื่องจากมีสภาพขั้วที่แตกต่างกันมากอีกทั้งแป้งมันฝรั่งก็มีการรวมตัวกันดังที่กล่าวไปแล้วในส่วนแรก โดยเมื่อทำการเติมกลีเซอรอลลงในพอลิเมอร์ผสมสามารถเพิ่มค่าความทนต่อแรงดึงได้ เนื่องจากกลีเซอรอลเข้าไปช่วยลดการเกาะกลุ่มของแป้ง ทำให้แอกโกโมเลตของแป้งมันฝรั่งมีขนาดที่เล็กลง การกระจายตัวในเนื้อยางธรรมชาติเกิดได้ดีขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มที่ได้เพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง แต่เมื่อพิจารณาค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมจากเทคนิคการผสมต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าที่แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมแป้งมันฝรั่งในสัดส่วน 10 และ 20 ค่าความทนแรงดึงของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing สูงกว่าที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม พบว่าที่สัดส่วนแป้งมันฝรั่งที่สูงขึ้นต่างๆ ค่าความทนแรงดึงของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing จะสูงกว่าที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing อย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากผสมแบบ dry mixing โดยเครื่องผสมยางสามารถทำให้แป้งมันฝรั่งกระจายตัวได้ดีกว่า เนื่องจากมีแรงเฉือนที่สูงกว่า

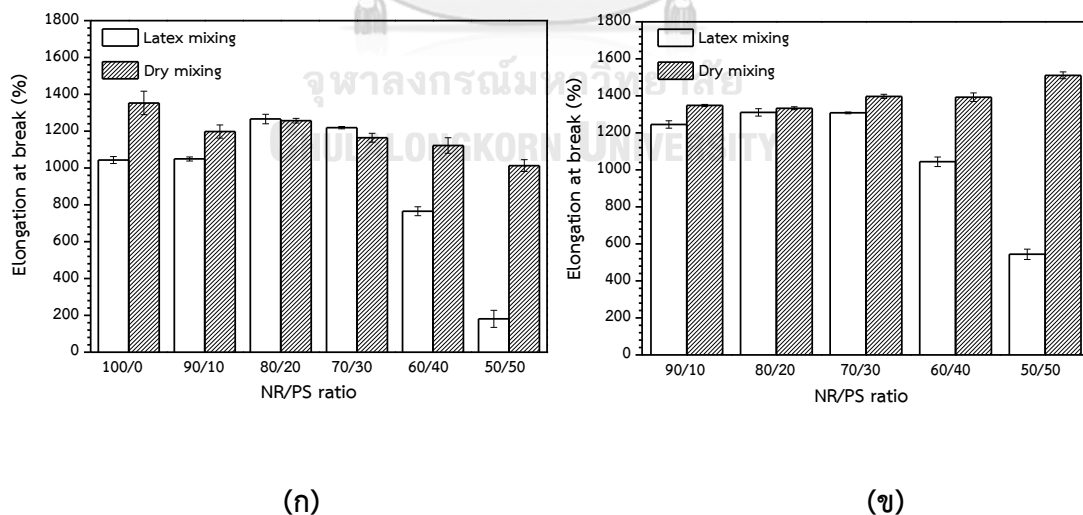
รูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.8 พบว่า แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอลมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ต่ำกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมแป้งมันฝรั่ง โดยค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงที่เพิ่มปริมาณแป้งมันฝรั่งจาก 10 เป็น 20 ส่วน แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งมันฝรั่งขึ้นไปอีก ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลงอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติมกลีเซอรอลความสามารถในการยืดตัวของแผ่นฟิล์มจะต่างออกไป โดยพบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 90/10 และ 80/20 และมีการเติมกลีเซอรอลมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ไม่แตกต่างจากแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแป้งมันฝรั่งเป็น 30, 40 และ 50 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ได้มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ซึ่งสูงกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติอีกด้วย และค่าที่ได้เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณแป้งมันฝรั่ง โดยแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 50/50 และการเติมกลีเซอรอลมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด สูงถึง  $1511 \pm 18\%$  แต่เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมจากเทคนิคการผสมต่างกัน



ดังแสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าที่แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 ทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่าที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing อย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับค่าความทนแรงดึง ในขณะที่สัดส่วนอื่นไม่เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน



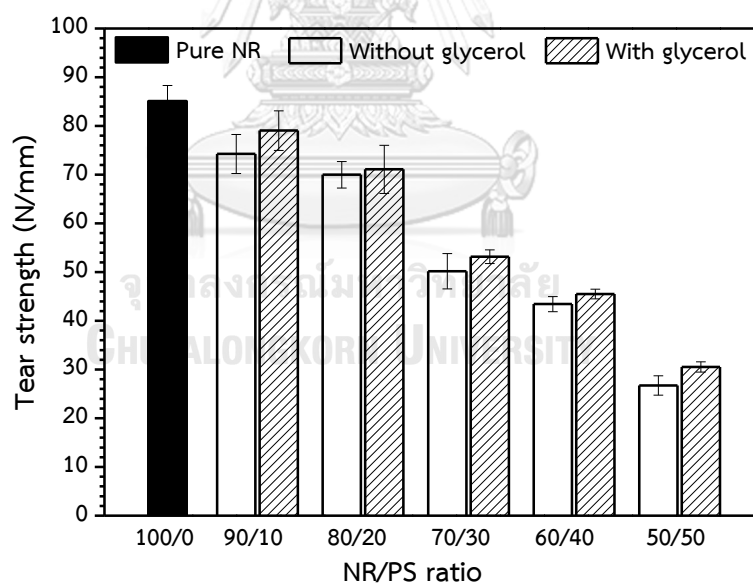
รูปที่ 4.20 อิทธิพลของกระบวนการเตรียมต่อค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง ก) ไม่เติมกลีเซอรอล ข) เติมกลีเซอรอล



รูปที่ 4.21 อิทธิพลของกระบวนการเตรียมต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง ก) ไม่เติมกลีเซอรอล ข) เติมกลีเซอรอล

#### 4.2.4 สมบัติความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจาก เทคนิคการผสมแบบ dry mixing

รูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.9 แสดงค่าความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing ทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล พบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงสุดอยู่ที่  $85.06 \pm 3.26$  N/mm เมื่อมีการเติมแป้งมันฝรั่งลงในยางธรรมชาติทำให้ได้แผ่นฟิล์มที่มีความต้านทานการฉีกขาดลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาณแป้งมันฝรั่งที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดและการเกาะกลุ่มกันของแป้งมันฝรั่ง โดยที่อัตราส่วน 50/50 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งมีค่าความต้านทานการฉีกขาดอยู่ที่  $26.71 \pm 1.99$  และ  $30.54 \pm 1.06$  N/mm ในกรณีที่ไม่เติมและที่เติมกลีเซอรอล ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การเติมกลีเซอรอลสามารถช่วยลดการเกาะกลุ่มกันของแป้งมันฝรั่งได้ ซึ่งจะเห็นว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมกลีเซอรอลมีค่าความทนต่อการฉีกขาดสูงกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอล

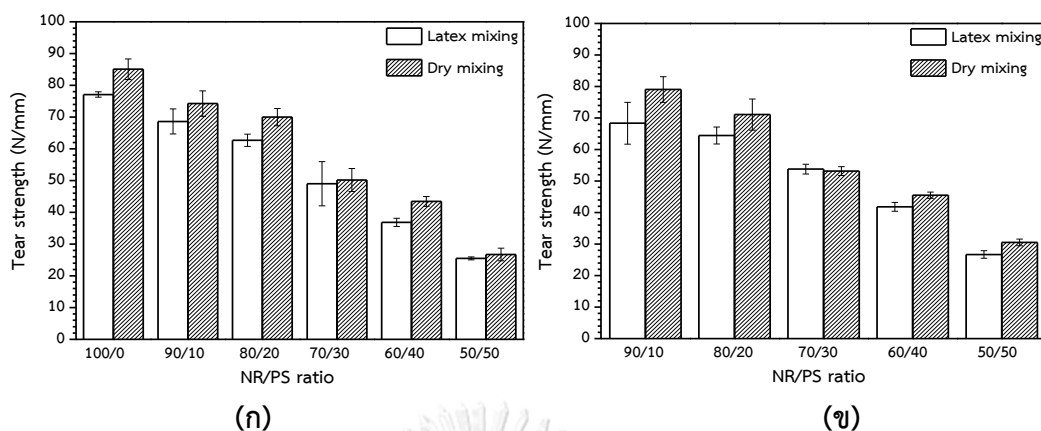


รูปที่ 4.22 สมบัติความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์ม NR/PS โดยเทคนิค dry mixing

NR/PS	tear strength (N/mm)
100/0	85.06 ± 3.26
90/10	74.24 ± 3.98
80/20	69.99 ± 2.72
70/30	50.19 ± 3.63
60/40	43.44 ± 1.56
50/50	26.71 ± 1.99
90/10/Gly10	79.04 ± 4.08
80/20/Gly10	71.09 ± 4.93
70/30/Gly10	53.17 ± 1.42
60/40/Gly10	45.51 ± 0.98
50/50/Gly10	30.54 ± 1.06

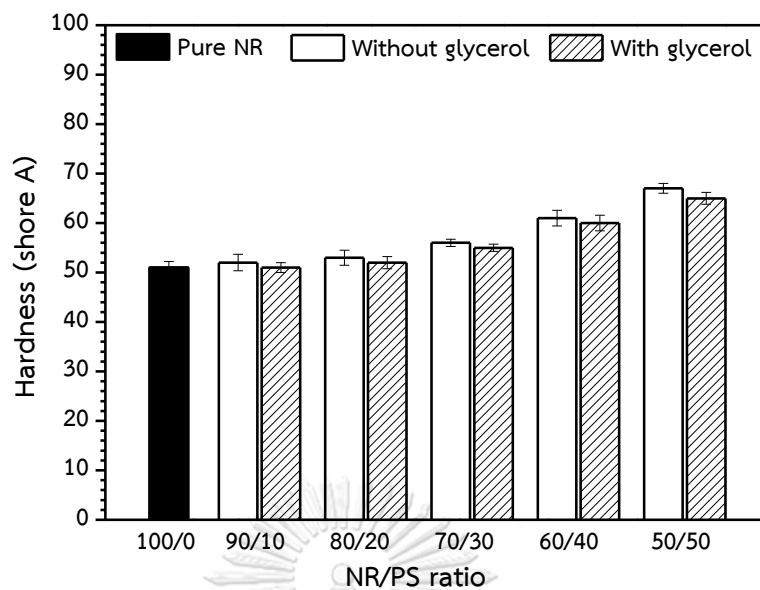
เมื่อพิจารณาความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมจากเทคนิคการผสมต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าที่แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมแป้งมันฝรั่งที่ทุกอัตราส่วนทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing มีค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงกว่าที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing เนื่องจากแป้งมันฝรั่งกระจายตัวได้ดีกว่าเนื่องจากเครื่องผสมให้ค่าแรงเฉือนที่สูงกว่า



รูปที่ 4.23 อิทธิพลของกระบวนการเตรียมต่อค่าความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง ก) ไม่เติมกลีเซอรอล ข) เติมกลีเซอรอล

#### 4.2.5 สมบัติความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบdry mixing

รูปที่ 4.24 และตารางที่ 4.10 แสดงค่าความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing ทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล พบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติมีค่าความแข็งต่ำสุดอยู่ที่  $51 \pm 1.22$  shore A อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติมแป้งมันฝรั่งส่งผลทำให้แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีการเติมแป้งมันฝรั่งมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และค่าที่เพิ่มขึ้นแปรตามปริมาณแป้งมันฝรั่งที่เติม โดยแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 50/50 มีค่าความแข็ง  $67 \pm 1.00$  และ  $65 \pm 1.22$  shore A ในกรณีที่ไม่เติมและที่เติมกลีเซอรอล ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของการเติมกลีเซอรอลต่อค่าความแข็งของแผ่นฟิล์ม จะเห็นว่าการเติมกลีเซอรอลส่งผลทำให้ค่าความแข็งของแผ่นฟิล์มลดลง

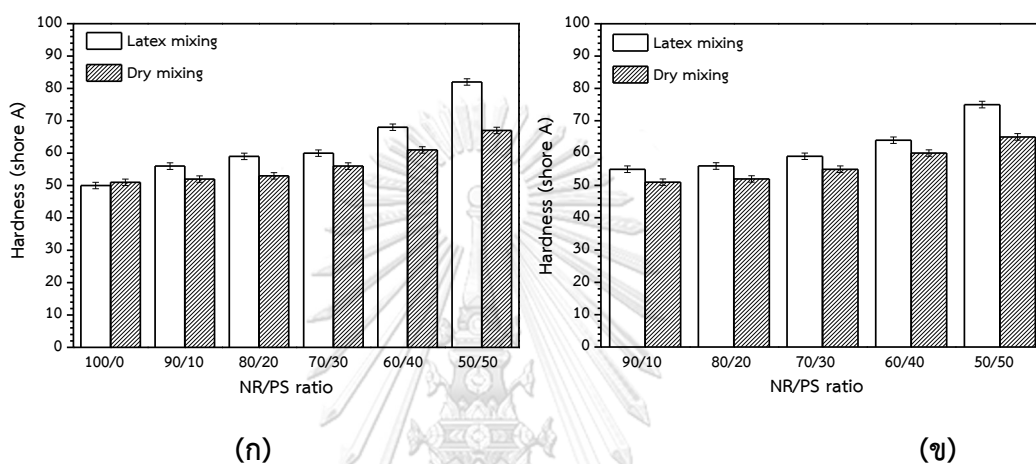


รูปที่ 4.24 สมบัติความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing

ตารางที่ 4.10 สมบัติความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing

NR/PS	hardness (shore A)
100/0	51 ± 1.22
90/10	52 ± 1.67
80/20	53 ± 1.52
70/30	56 ± 0.71
60/40	61 ± 1.58
50/50	67 ± 1.00
90/10/Gly10	51 ± 1.00
80/20/Gly10	52 ± 1.22
70/30/Gly10	55 ± 0.71
60/40/Gly10	60 ± 1.58
50/50/Gly10	65 ± 1.22

เมื่อพิจารณาความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เตรียมจากเทคนิคการผสมต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าที่แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมแป้งมันฝรั่งที่ทุกอัตราส่วนทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing มีความแข็งต่ำกว่าที่เตรียมได้จากเทคนิคการผสมแบบ latex mixing เนื่องจากแป้งมันฝรั่งกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีกว่า ทำให้ได้ค่าความแข็งของฟิล์มลดลง



รูปที่ 4.25 อิทธิพลของกระบวนการเตรียมต่อค่าความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง  
ก) ไม่เติมกลีเซอรอล ข) เติมกลีเซอรอล

#### 4.2.6 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing

ตารางที่ 4.11 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 จากผลการทดลองพบว่าช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติและของแป้งมันฝรั่งอยู่ที่ 349.92 - 410.07 และ 288.70 - 315.94 °C ตามลำดับ สำหรับแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล พบว่าที่ทุกอัตราส่วน อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนเป็นแบบ 2 ขั้น โดยแป้งมันฝรั่งที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อยางธรรมชาติเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลงเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มแป้งมันฝรั่งบริสุทธิ์ โดยในกรณีที่ไม่เติมกลีเซอรอลมีแนวโน้มที่ต่ำลงมากกว่ากรณีที่ไม่มีการเติม ในขณะที่ยางธรรมชาติในแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย

**ตารางที่ 4.11** อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งจากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing

NR/PS	onset temperature of mass loss (°C)		endset temperature of mass loss (°C)	
	1 st peak	2 nd peak	1 st peak	2 nd peak
100/0	349.92		410.07	
90/10	267.90	352.55	303.48	407.78
80/20	273.78	355.53	283.44	405.73
70/30	267.90	352.55	303.48	407.78
60/40	285.10	359.62	312.07	402.71
50/50	286.73	358.74	317.61	402.16
90/10/Gly10	268.19	354.29	298.40	408.22
80/20/Gly10	271.71	357.71	302.05	409.34
70/30/Gly10	271.51	357.41	307.33	407.68
60/40/Gly10	270.38	357.80	306.52	406.90
50/50/Gly10	272.87	359.26	313.72	408.53
0/100	288.70		315.94	

### 4.3 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing

จากผลการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นว่าการเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งด้วยเทคนิคการผสมแบบ dry mixing มีข้อได้เปรียบมากกว่าเทคนิคการผสมแบบ latex mixing ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของกระบวนการที่ทำได้ง่ายกว่า อีกทั้งการกระจายตัวของแป้งมันฝรั่งที่มากกว่า ดังนั้นในส่วนของ การทดลองนี้จะเลือกใช้เทคนิคการผสมแบบ dry mixing โดยจะเปลี่ยนจากการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้จากกลีเซอรอลเป็นสารคู่ควบไซเลน Si-69 แทน เนื่องจากโครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนจะมีส่วนของหมู่อัลคอกซี (alkoxy groups) ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง และส่วนที่เป็นกำมะถันซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสายโซ่ยางได้ จึงคาดว่าน่าจะมีความเป็นได้ที่จะทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับแป้งมันฝรั่งมีค่าเพิ่มมากขึ้น

#### 4.3.1 สมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing

รูปที่ 4.26 แสดงลักษณะปรากฏของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมไซเลน (NR/PS/Si69) ซึ่งเตรียมโดยเทคนิค dry mixing ที่อัตราส่วน 90/10 และ 80/20 ที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 ในปริมาณ 10 phr ตามลำดับ เมื่อมองด้วยตาเปล่าจากรูป พบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้มีพื้นสีน้ำตาลเข้ม เมื่อเพิ่มแป้งมันฝรั่งขึ้นเป็น 20 ส่วน เริ่มสังเกตเห็นจุดสีน้ำตาลได้มากขึ้น นอกจากนี้เมื่อทำการสัมผัสแผ่นฟิล์ม พบว่าแผ่นฟิล์มที่มีปริมาณแป้งมันฝรั่งน้อยที่สุดมีความยืดหยุ่นและมีลักษณะเหนียวมากที่สุดเนื่องจากมียางธรรมชาติที่มีลักษณะอ่อนนุ่มและยืดหยุ่นได้ดีเป็นเฟสหลักอยู่ เมื่อเพิ่มแป้งมันฝรั่งพบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะแข็งมากขึ้นเนื่องจากแป้งมันฝรั่งเป็นเฟสแข็งส่งผลให้แผ่นฟิล์มมีลักษณะแข็งและยืดหยุ่นน้อยลง

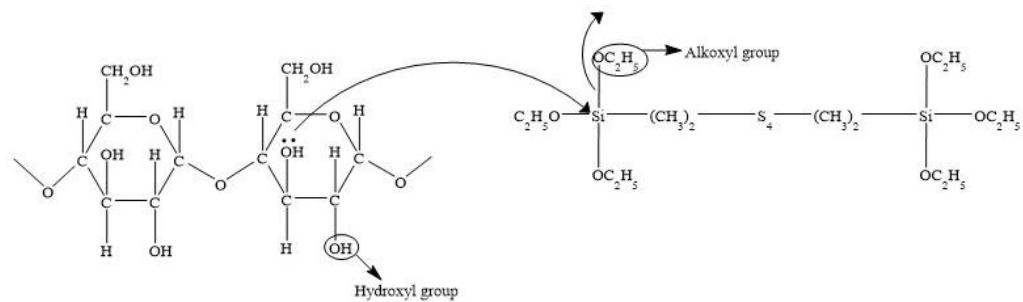
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมกลีเซอรอลกับแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 พบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 มีจุดบนผิวที่เกิดจากการรวมตัวกันของแป้งมันฝรั่งที่น้อยกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งมีสาเหตุเนื่องมาจากหมู่อัลคอกซี (alkoxy group) ของสารคู่ควบไซเลนสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันฝรั่งได้ จึงช่วยลดการเกาะกลุ่มกันของแป้งมันฝรั่งได้ดังกลไกที่เสนอในรูปที่ 4.27 เช่นเดียวกับกรณีของไซเลนที่ลดการ



รวมตัวของซิลิกา [55] นอกจากนี้อีกด้านของสารคู่ควบไซเลน Si-69 ยังสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้อีกด้วย ซึ่งต่างจากกลีเซอรอลเนื่องจากไม่มีส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้เลย



รูปที่ 4.26 แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน (NR/PS/Si69) จากการเตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing



CHULALONGKORN UNIVERSITY

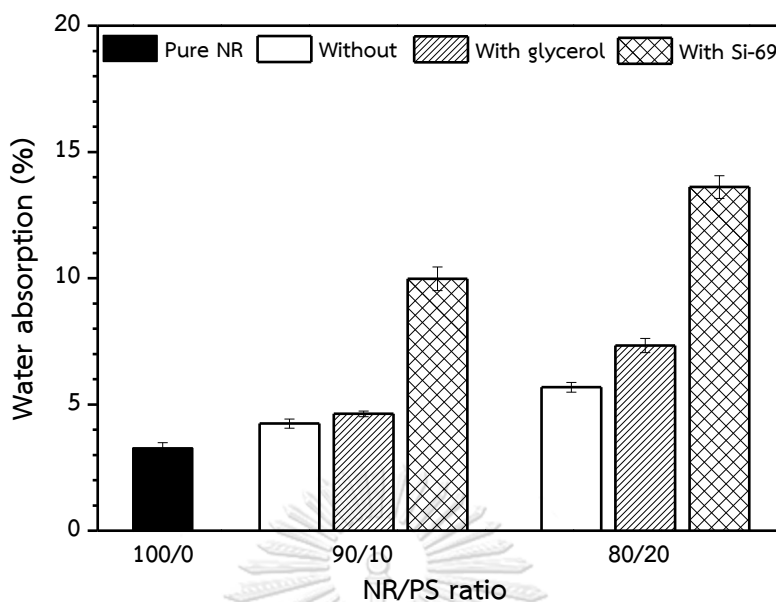
รูปที่ 4.27 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารคู่ควบไซเลน

#### 4.3.2 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบ ไซเลน Si-69 จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing

ตารางที่ 4.12 แสดงความสามารถในการดูดซับน้ำ (% water absorption) ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 90/10 และ 80/20 จากกระบวนการผสมแบบ dry mixing เมื่อมีการเติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 โดยปริมาณการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันฝรั่งที่เติม และรูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับน้ำระหว่างแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มเข้ากันได้กับที่เติมกลีเซอรอลและสารคู่ควบไซเลน Si-69

ตารางที่ 4.12 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมไซเลนที่เตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing

NR/PS/Si69	water absorption (%)
90/10/Si69	9.89 ± 0.47
80/20/Si69	13.61 ± 0.45



รูปที่ 4.28 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 เทียบกับทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล จากการเตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing

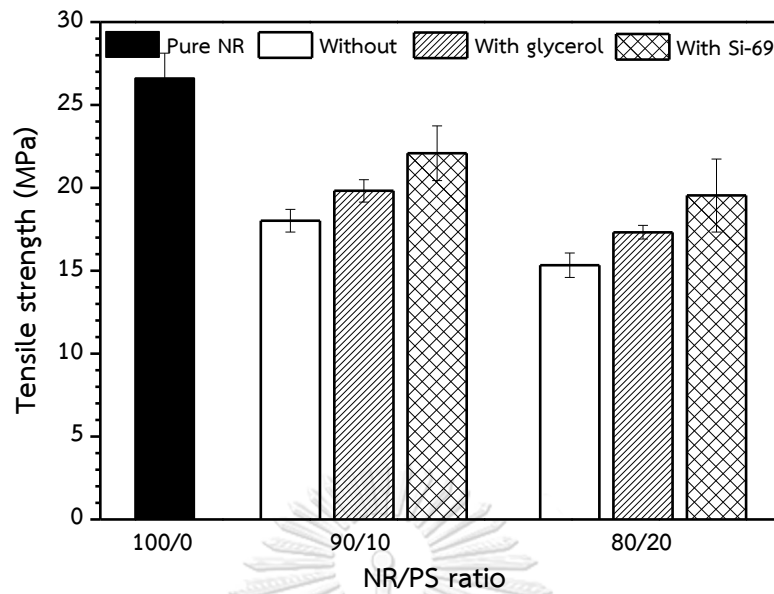
สำหรับแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 จากผลการทดลองข้างต้นเบื้องต้นพบว่าการเติมแป้งมันฝรั่งลงในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับการทดลองที่ได้ก่อนหน้านี โดยยิ่งเติมแป้งมันฝรั่งมากขึ้นก็ยิ่งมีการดูดซับน้ำมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า การเปลี่ยนสารเพิ่มความเข้ากันได้จากกลีเซอรอลเป็นสารคู่ควบไซเลน Si-69 ช่วยทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มมากยิ่งขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทั้งที่อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อแป้งมันฝรั่ง 90/10 และ 80/20 ทั้งนี้คาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากสารคู่ควบไซเลน Si-69 สามารถลดการรวมตัวของแป้งมันฝรั่งได้ดีกว่า ทำให้แป้งมันฝรั่งในยางธรรมชาติดูดซับน้ำได้ดีกว่ากรณีที่ใช้กลีเซอรอล

#### 4.3.3 สมบัติความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติม Si-69 จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing

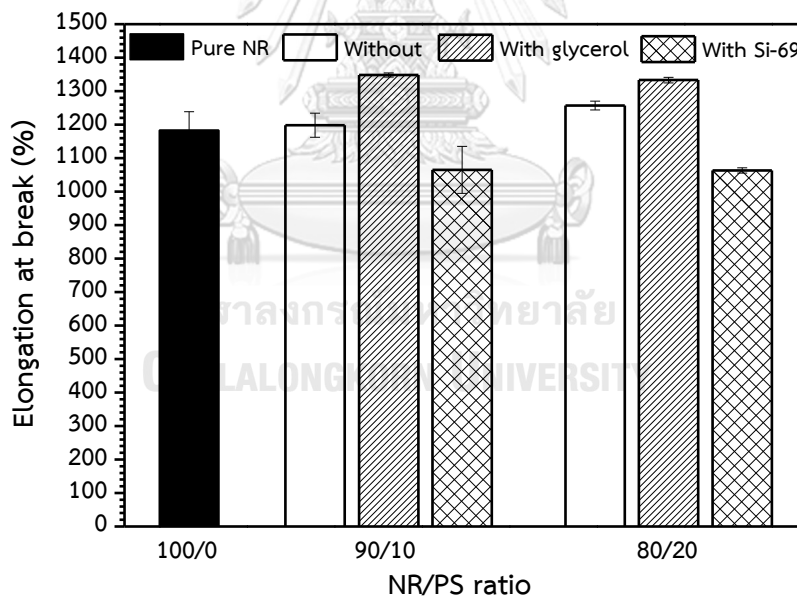
ค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (% elongation at break) ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 100/0, 90/10 และ 80/20 จากกระบวนการผสมแบบ dry mixing เมื่อมีการเติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 แสดงในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.29 - 4.30 แสดงการเปรียบเทียบค่าทั้งสองระหว่างแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มเข้ากันได้กับที่เติมกลีเซอรอลและสารคู่ควบไซเลน Si-69

**ตารางที่ 4.13** สมบัติความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 จากกระบวนการผสมแบบ dry mixing

NR/PS/Si69	tensile strength (MPa)	elongation at break (%)
90/10/Si69	22.08 ± 1.65	1065 ± 70.00
80/20/Si69	19.54 ± 2.20	1063 ± 8.09



รูปที่ 4.29 ค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 เทียบกับทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล จากการเตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing



รูปที่ 4.30 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 เทียบกับทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล จากการเตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing

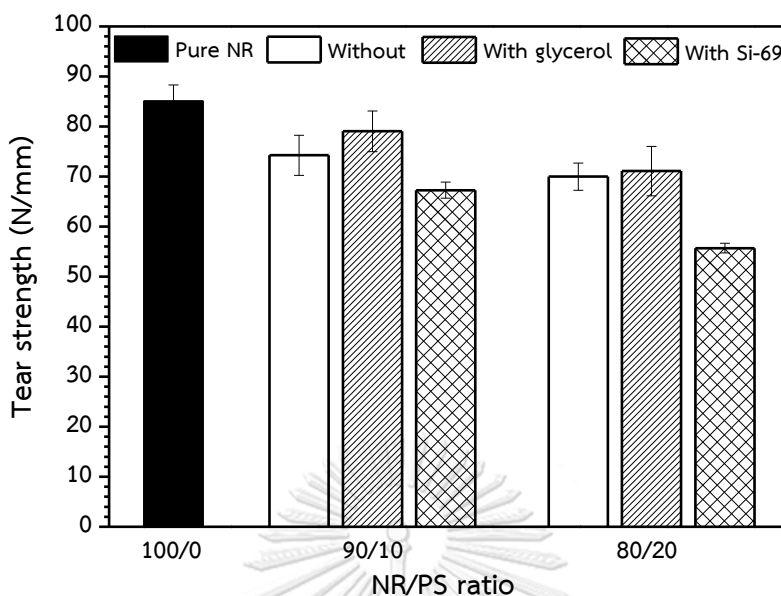
จากรูปที่ 4.29 พบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ เมื่อมีการเติมแป้งมันฝรั่งลงไป มีค่าความทนต่อแรงดึงลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณแป้งมันฝรั่งที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ไม่ว่าจะเป็นกลีเซอรอลหรือสารคู่ควบไซเลน Si-69 แผ่นฟิล์มที่ได้มีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้สารคู่ควบไซเลน Si-69 ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้กลีเซอรอล ทั้งนี้เนื่องมาจากสารคู่ควบไซเลน Si-69 นอกจากลดการเกาะกลุ่มกันของแป้งแล้วยังช่วยทำให้ยางธรรมชาติและแป้งมันฝรั่งเกิดอันตรกิริยาต่อกันอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและแป้งมันฝรั่งส่งผลทำให้ความสามารถในการยืดตัวลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด น้อยกว่าที่เติมกลีเซอรอลอย่างชัดเจน อีกทั้งน้อยกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ด้วย

#### 4.3.4 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติม Si-69 จากเทคนิคการผสมแบบ dry mixing

ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 100/0, 90/10 และ 80/20 จากกระบวนการผสมแบบ dry mixing เมื่อมีการเติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 แสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดระหว่างแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้กับที่เติมกลีเซอรอลและสารคู่ควบไซเลน Si-69

ตารางที่ 4.14 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 จากกระบวนการผสมแบบ dry mixing

NR/PS/Si69	tear strength (N/mm)
90/10/Si69	67.28 ± 1.58
80/20/Si69	55.69 ± 0.95



รูปที่ 4.31 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่เติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 เทียบกับทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล จากการเตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing

จากรูปที่ 4.31 พบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ เมื่อมีการเติมแป้งมันฝรั่งลงไป แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงตามปริมาณแป้งมันฝรั่งที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการเติมกลีเซอรอล แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งมีความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าในหัวข้อก่อนหน้านี้พบว่า การเปลี่ยนจากสารเพิ่มความเข้ากันได้จากกลีเซอรอลเป็นสารคู่ควบไซเลน Si-69 ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้นแต่กลับพบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งมีความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงและมีค่าน้อยกว่าที่ไม่เติมอะไรเลยอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของ Si-69 มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบซึ่งสามารถเข้าทำปฏิกิริยารีดอกซ์เหมือนกับกำมะถันอิสระที่เติมลงไปได้อย่างได้เช่นกัน ดังนั้นจึงทำให้ระบบเกิดการคงรูปเพิ่มมากขึ้นกว่ากรณีทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล ซึ่งผลในส่วนนี้สามารถยืนยันได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด โดยอย่างที่มีการคงรูปหรือการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่สูงจะมีการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำ เนื่องจากสายโซ่เกิดการยึดติดกันด้วยพันธะเคมีจำนวนมากทำให้ไม่สามารถขยับเขยื้อนหรือยืดตัวออกได้มาก ณ จุดขาด จึงมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำ จากรูปที่ 4.30 จะเห็นว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ต่ำที่สุด ซึ่งผลที่ได้บ่งชี้ได้ว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมสารคู่ควบ

ไซเลน Si-69 มีปริมาณการคงรูปมากที่สุด โดย Hamed [56] ได้กล่าวไว้ว่า ค่าความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดนั้นจะเพิ่มขึ้นในช่วงต้นเมื่อมีปริมาณการคงรูปเพิ่มขึ้น จากนั้นจะผ่านจุดสูงสุดและเริ่มลดลงหากยังคงมีปริมาณการคงรูปเพิ่มมากขึ้นไปอีก โดยความต้านทานต่อการฉีกขาดจะอ่อนไหวต่อปริมาณการคงรูปที่เพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีของค่าความทนต่อแรงดึง กล่าวคือ ช่วงปริมาณการคงรูปที่เพิ่มขึ้นแล้วทำให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้นนั้นจะแคบมาก ในขณะที่ค่าความทนต่อแรงดึงนั้น ช่วงปริมาณการคงรูปที่เพิ่มขึ้นแล้วทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นนั้นจะกว้างมาก ดังนั้นการที่พบว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 มีค่าความทนต่อแรงดึงที่สูงกว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล แต่กลับมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ต่ำกว่า อาจมีสาเหตุเนื่องจากการมีปริมาณการคงรูปที่สูงขึ้น ซึ่งอาจเลยจุดที่ให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงสุดไปแล้ว ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น





## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อแป้งมันฝรั่งต่างๆ กัน ดังนี้ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ทั้งที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ 2 ชนิด คือ กลีเซอรอลและสารคู่ควบไซเลน Si-69 ด้วยเทคนิคการเตรียมแบบ latex mixing และ dry mixing หลังจากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบกดอัด เพื่อให้ได้เป็นแผ่นฟิล์ม จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติการดูดซับน้ำ โครงสร้างทางหมู่ฟังก์ชันทางเคมี สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มที่ได้ โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- การเติมแป้งมันฝรั่งลงในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติส่งผลให้การคงรูปของยางธรรมชาติเกิดได้ช้าลง แต่เมื่อมีการเติมกลีเซอรอลลงไปช่วยลดปัญหาข้างต้นได้

- การเติมแป้งมันฝรั่งลงในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติส่งผลให้แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติสามารถดูดซับน้ำได้ และปริมาณการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแป้งมันฝรั่งที่เติมลงไป เมื่อมีการเติมกลีเซอรอลลงไปช่วยทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำเกิดได้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเติมแป้งมันฝรั่งส่งผลทางด้านลบต่อสมบัติเชิงกลยกเว้นค่าความแข็งของแผ่นฟิล์ม โดยยิ่งเติมแป้งมันฝรั่งมาก สมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาดก็ยิ่งลดลง อย่างไรก็ตามปัญหาในส่วนนี้สามารถบรรเทาได้เมื่อมีการเติมกลีเซอรอล แต่ก็ยังคงได้สมบัติดังกล่าวไม่ดีเท่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติบริสุทธิ์ ดังนั้นปริมาณแป้งมันฝรั่งที่เติมไม่ควรเกิน 20 ส่วน เนื่องจากที่สัดส่วนมากกว่านี้สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มลดลงอย่างมาก

- การเติมแป้งมันฝรั่งลงในแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ ทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลส่งผลให้แป้งมันฝรั่งซึ่งเป็นเฟสที่กระจายตัวเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้ง่าย ในขณะที่การสลายตัวของยางธรรมชาติซึ่งเป็นเฟสหลักมีแนวโน้มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น

- เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งส่งผลโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มที่ได้ โดยในการศึกษาครั้งนี้พบว่า การเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งด้วยเทคนิค dry mixing นอกจากเป็นเทคนิคที่สะดวกแล้ว ยังพบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมด้วยเทคนิค latex mixing ซึ่งมีสาเหตุมาจากการกระจายของแป้งมันฝรั่งในเนื้อเยื่อที่ดีกว่า

- เมื่อเติมสารคู่ควบไซเลน Si-69 แทนการเติมกลีเซอรอล ทำให้ได้แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งที่ได้มีความสามารถในการดูดซับน้ำและความทนต่อแรงดึงที่ดียิ่งขึ้น แต่ความต้านทานต่อการฉีกขาดกลับมีค่าต่ำที่สุดอีกทั้งน้อยกว่ากรณีที่ไม่เติมกลีเซอรอลอีกด้วย

### ข้อเสนอแนะ

1. ในการพัฒนาแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่ง หากมีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้แบบไฮบริดอาจจะได้แผ่นฟิล์มที่มีสมบัติการดูดซับน้ำและสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น
2. การศึกษาการกระจายตัวของแป้งมันฝรั่งในเนื้อเยื่อธรรมชาติเพิ่มเติมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดจะสามารถทำให้อธิบายผลการทดลองได้ดีมากขึ้น

## บรรณานุกรม

### ภาษาไทย

- [1] สุวดี ก้องพารากุล. ว.วิทย.มข. เทคโนโลยีการตัดแปรรยางธรรมชาติและการประยุกต์ใช้. 41(3):567-81, 2556.
- [8] ชาญวิทย์ สมศักดิ์. ภาพต้นยางพารา [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://pararubber-th.blogspot.com/2010/07/1.html> [7 มีนาคม 2563]
- [10] รศ.ดร.จิตต์ลัดดา ศักตาทิพาณิชย์. เทคโนโลยียางธรรมชาติ. กรุงเทพมหานคร: เทคโนโลยีคอมมิวนิเคชั่นส์, 2553.
- [12] น้ำยงขัน. องค์การสวนยาง, 2014.
- [13] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี : ผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber Products: Manufacturing & Technology). กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว), 2552.200.
- [14] เสาวนีย์ ก่ออุฒิกุลรังษี. การผลิตยางธรรมชาติ. สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาลัยเขตปัตตานี, 2543.
- [16] พงษ์ธร แซ่ฮุย และ ชาคริต สิริสิงห. ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), 2550. 11-29.
- [17] วิภาวี พัฒนกุล. ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์. นครปฐม: กลุ่มอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2554.
- [18] รัฐพงษ์ หนูหมาด. การศึกษาพันธะเชื่อมโยงและการเสื่อมสภาพของฟิล์มยางโดยเทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2552.
- [19] พงษ์ธร แซ่ฮุย. สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2548.
- [20] ดุษฎี อุดภาพ และ นื่องนุช เจริญกุล. เคมีและสมบัติของแป้ง [ออนไลน์]. 2558. แหล่งที่มา: [http://digital\\_collect.lib.buu.ac.th/dcms/files/56920132.pdf](http://digital_collect.lib.buu.ac.th/dcms/files/56920132.pdf) [7 มีนาคม 2563]
- [21] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.
- [23] วันชัย เลิศวิจิตรจรัส. เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์ชีวภาพ. นครปฐม: คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 2553.
- [25] พจน์ ศรีบุญลือ, พัชรี บุญศิริ, ชฎามาศ พิณจสุนทร, และ เปรมใจ อารีจิตรานุสรณ์. ตำรา

ชีวะเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 6. ขอนแก่น: โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา, 2555.

- [47] วริศรา บรภาค, ณรงค์ เชื่องชยะพันธุ์, สกฤรัตน์ พิชัยยุทธ์, และ วรณรัตน์ เชื่องชยะพันธุ์. ผลของปริมาณซิลิกาต่อสมบัติของยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยซิลิกาที่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากัน. Walailak Procedia 2019(3) (2019): 43-43.
- [53] เสาวลักษณ์ บุญยอด และ ชัยวุฒิ วัตจัจ. การเตรียมยางบวมน้ำจากยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยโซเดียมอะคริเลต. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 25, 791-807, 2560.

### ภาษาอังกฤษ

- [2] Juntuek, P., Ruksakulpiwat, C., Chumsamrong, P., and Ruksakulpiwat, Y. Glycidyl methacrylate grafted natural rubber: synthesis, characterization, and mechanical property. Journal of Applied Polymer Science 122(5) (2011): 3152-3159.
- [3] Li, M., Li, D., Wang, L.-j., and Adhikari, B. Creep behavior of starch-based nanocomposite films with cellulose nanofibrils. Carbohydrate polymers 117 (2015): 957-963.
- [4] Dai, L., Qiu, C., Xiong, L., and Sun, Q. Characterisation of corn starch-based films reinforced with taro starch nanoparticles. Food chemistry 174 (2015): 82-88.
- [5] Chakraborty, S., Sahoo, B., Teraoka, I., Miller, L.M., and Gross, R.A. Enzyme-catalyzed regioselective modification of starch nanoparticles. Macromolecules 38(1) (2005): 61-68.
- [6] Jiang, Q., Wang, J., Tang, R., Zhang, D., and Wang, X. Hypromellose succinate-crosslinked chitosan hydrogel films for potential wound dressing. International journal of biological macromolecules 91 (2016): 85-91.
- [7] Marcelo, G., Lopez-Gonzalez, M., Trabado, I., Rodrigo, M.M., Valiente, M., and Mendicuti, F. Lignin inspired PEG hydrogels for drug delivery. Materials Today Communications 7 (2016): 73-80.
- [9] Arvind mafatlal group. Vulcanization & Accelerators [online]. 2014. Available from: <http://www.nocil.com/detail/technical/technical-notes/64> [27 May 2020]
- [11] Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension. 2016, ASTM International: West Conshohocken, PA.
- [15] Baker, C. and Gelling, I. Epoxidized natural rubber. in Developments in Rubber Technology—4, pp. 87-117: Springer, 1987.

- [22] Sadegh-Hassani, F. and Nafchi, A.M. Preparation and characterization of bionanocomposite films based on potato starch/halloysite nanoclay. International journal of biological macromolecules 67 (2014): 458-462.
- [24] Qiao, X., Tang, Z., and Sun, K. Plasticization of corn starch by polyol mixtures. Carbohydrate polymers 83(2) (2011): 659-664.
- [26] He, M., Li, Y., Qiao, B., Ma, X., Song, J., and Wang, M. Effect of dicumyl peroxide and phenolic resin as a mixed curing system on the mechanical properties and morphology of TPVs based on HDPE/ground tire rubber. Polymer Composites 36(10) (2015): 1907-1916.
- [27] Nakason, C., Kaesaman, A., and Supasanthitikul, P. The grafting of maleic anhydride onto natural rubber. Polymer Testing 23(1) (2004): 35-41.
- [28] Sengloyluan, K., Sahakaro, K., and Noordermeer, J.W. Silica-reinforced natural rubber compounds compatibilized through the use of epoxide functional groups and TESPT combination. in Advanced materials research, pp. 272-275: Trans Tech Publ, 2014.
- [29] Pongdong, W., Nakason, C., Kummerlöwe, C., and Vennemann, N. Influence of filler from a renewable resource and silane coupling agent on the properties of epoxidized natural rubber vulcanizates. Journal of Chemistry 2015 (2015).
- [30] Artchomphoo, J. and Saijan, D. The Effect of Modified Natural Rubber and Silane on Properties of Silica Filled Natural Rubber Composite. in, 2014.
- [31] Ghasemlou, M., Khodaiyan, F., and Oromiehie, A. Physical, mechanical, barrier, and thermal properties of polyol-plasticized biodegradable edible film made from kefiran. Carbohydrate polymers 84(1) (2011): 477-483.
- [32] Khalaf, A. and Sadek, E. Compatibility study in natural rubber and maize starch blends. Journal of Applied Polymer Science 125(2) (2012): 959-967.
- [33] Duy, N.Q., Rashid, A.A., and Ismail, H. Effects of filler loading and different preparation methods on properties of cassava starch/natural rubber composites. Polymer-Plastics Technology and Engineering 51(9) (2012): 940-944.
- [34] Piermaria, J.A., Pinotti, A., Garcia, M.A., and Abraham, A.G. Films based on kefiran, an exopolysaccharide obtained from kefir grain: Development and characterization. Food hydrocolloids 23(3) (2009): 684-690.

- [35] Piermaria, J., Bosch, A., Pinotti, A., Yantorno, O., Garcia, M.A., and Abraham, A.G. Kefiran films plasticized with sugars and polyols: water vapor barrier and mechanical properties in relation to their microstructure analyzed by ATR/FT-IR spectroscopy. Food hydrocolloids 25(5) (2011): 1261-1269.
- [36] da Matta Jr, M.D., Sarmiento, S.B.S., de Oliveira, L.M., and Zocchi, S.S. Mechanical properties of pea starch films associated with xanthan gum and glycerol. Starch-Stärke 63(5) (2011): 274-282.
- [37] Ehivet, F.E., Min, B., Park, M.K., and Oh, J.H. Characterization and antimicrobial activity of sweetpotato starch-based edible film containing origanum (thymus capitatus) oil. Journal of Food Science 76(1) (2011): C178-C184.
- [38] Sanyang, M.L., Sapuan, S.M., Jawaid, M., Ishak, M.R., and Sahari, J. Effect of plasticizer type and concentration on tensile, thermal and barrier properties of biodegradable films based on sugar palm (Arenga pinnata) starch. Polymers 7(6) (2015): 1106-1124.
- [39] Wang, Z.-F., et al. The impact of esterification on the properties of starch/natural rubber composite. Composites Science and Technology 69(11) (2009): 1797-1803.
- [40] Vudjung, C., et al. Effect of natural rubber contents on biodegradation and water absorption of interpenetrating polymer network (IPN) hydrogel from natural rubber and cassava starch. Energy Procedia 56 (2014): 255-263.
- [41] Zeng, Z., Ren, W., Xu, C., Lu, W., Zhang, Y., and Zhang, Y. Maleated natural rubber prepared through mechanochemistry and its coupling effects on natural rubber/cotton fiber composites. Journal of polymer research 17(2) (2010): 213-219.
- [42] Dechojarassri, D., Narumon, R., Siriphat, C., and Panu, D. Mechanical properties of natural rubber composites filled with starch sludge compared with other waste and commercial fillers. International Journal of Chemical Engineering and Applications 8(3) (2017).
- [43] Trovatti, E., Carvalho, A.J.F., and Gandini, A. A new approach to blending starch with natural rubber. Polymer International 64(5) (2015): 605-610.

- [44] Ismail, H., Rusli, A., and Rashid, A. The effect of filler loading and epoxidation on paper-sludge-filled natural rubber composites. Polymer-Plastics Technology and Engineering 45(4) (2006): 519-525.
- [45] Rouilly, A., Rigal, L., and Gilbert, R.G. Synthesis and properties of composites of starch and chemically modified natural rubber. Polymer 45(23) (2004): 7813-7820.
- [46] Yew, G., Yusof, A.M., Ishak, Z.M., and Ishiaku, U. Water absorption and enzymatic degradation of poly (lactic acid)/rice starch composites. Polymer Degradation and Stability 90(3) (2005): 488-500.
- [48] Ismail, H., Othman, N., and Komethi, M. Curing characteristics and mechanical properties of rattan-powder-filled natural rubber composites as a function of filler loading and silane coupling agent. Journal of Applied Polymer Science 123(5) (2012): 2805-2811.
- [49] Ngamsurat, S., Boonkerd, K., Leela-adisorn, U., and Potiyaraj, P. Curing characteristics of natural rubber filled with gypsum. Energy Procedia 9 (2011): 452-458.
- [50] Nakason, C., Nakaramontri, Y., Kaesaman, A., Kangwansukpamonkon, W., and Kiatkamjornwong, S. Synthesis and characterization of water swellable natural rubber vulcanizates. European polymer journal 49(5) (2013): 1098-1110.
- [51] Sreekumar, P., Leblanc, N., and Saiter, J. Effect of Glycerol on the Properties of 100 % Biodegradable Thermoplastic Based on Wheat Flour. Journal of Polymers and the Environment 21 (2012).
- [52] Bouthegourd, E., Rajisha, K., Kalarical, N., Saiter, J.M., and Thomas, S. Natural rubber latex/potato starch nanocrystal nanocomposites: Correlation morphology/electrical properties. Materials Letters 65(23-24) (2011): 3615-3617.
- [54] Raghavendra, G.M., Jung, J., kim, D., and Seo, J. Step-reduced synthesis of starch-silver nanoparticles. International journal of biological macromolecules 86 (2016): 126-128.
- [55] Thongsang, S. and Sombatsompop, N. Effect of filler surface treatment on properties of fly ash/NR blends. Polymer Processing and Flow Group School of

Energy ad material, email: [narongrit.som@kmutt.ac.th](mailto:narongrit.som@kmutt.ac.th) hal (2005): 3278-3282.

- [56] Hamed, G.R. Materials and Compounds. in Gent, A.N. (ed.)Engineering with Rubber, pp. 11-36: Hanser, 2012.







ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก ก

ลักษณะการคงรูป (cure characteristics) ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล จากการเตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing

ตารางที่ ก-1 แสดงลักษณะการคงรูปของแผ่นฟิล์ม NR/PS 100/0

ครั้งที่	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H-M_L$ (dN.m)
1	2.78	4.70	0.36	6.96	6.60
2	2.18	4.62	0.36	5.92	5.75
3	2.76	4.40	0.39	6.91	6.55
average	2.57	4.57	0.37	6.60	6.30
SD	$\pm 0.34$	$\pm 0.16$	$\pm 0.02$	$\pm 0.59$	$\pm 0.48$

ตารางที่ ก-2 แสดงลักษณะการคงรูปของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10

ครั้งที่	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H-M_L$ (dN.m)
1	2.43	6.88	0.48	8.10	7.62
2	2.18	6.80	0.51	8.10	7.59
3	2.11	5.09	0.55	7.69	7.40
average	2.24	6.26	0.51	7.96	7.54
SD	$\pm 0.17$	$\pm 1.01$	$\pm 0.04$	$\pm 0.24$	$\pm 0.12$

ตารางที่ ก-3 แสดงลักษณะการคงรูปของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20

ครั้งที่	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H-M_L$ (dN.m)
1	4.32	6.15	0.40	9.37	9.09
2	4.14	5.94	0.40	9.45	9.05
3	4.06	5.75	0.43	9.33	8.93
average	4.17	5.95	0.41	9.38	9.02
SD	$\pm 0.13$	$\pm 0.20$	$\pm 0.02$	$\pm 0.06$	$\pm 0.08$

ตารางที่ ก-4 แสดงลักษณะการคงรูปของแผ่นฟิล์ม NR/PS 70/30

ครั้งที่	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H-M_L$ (dN.m)
1	3.98	5.25	0.13	10.12	9.99
2	4.25	5.49	0.16	10.18	10.02
3	4.02	5.34	0.15	10.11	9.96
average	4.08	5.36	0.15	10.14	9.99
SD	$\pm 0.15$	$\pm 0.12$	$\pm 0.02$	$\pm 0.04$	$\pm 0.03$

ตารางที่ ก-5 แสดงลักษณะการคงรูปของแผ่นฟิล์ม NR/PS 60/40

ครั้งที่	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H-M_L$ (dN.m)
1	4.44	5.47	0.27	12.25	11.98
2	4.25	5.33	0.28	12.01	11.73
3	4.33	5.57	0.26	12.23	11.75
average	4.34	5.46	0.27	12.16	11.82
SD	$\pm 0.10$	$\pm 0.12$	$\pm 0.01$	$\pm 0.13$	$\pm 0.14$

ตารางที่ ก-6 แสดงลักษณะการคงรูปของแผ่นฟิล์ม NR/PS 50/50

ครั้งที่	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H-M_L$ (dN.m)
1	4.12	4.54	0.31	12.69	12.57
2	4.12	4.94	0.27	12.50	12.24
3	4.03	5.03	0.31	11.76	13.05
average	4.09	4.84	0.30	12.32	12.62
SD	± 0.05	± 0.26	± 0.02	± 0.49	± 0.41

ตารางที่ ก-7 แสดงลักษณะการคงรูปของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10/Gly10

ครั้งที่	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H-M_L$ (dN.m)
1	3.24	5.35	0.44	7.43	6.98
2	3.33	5.23	0.45	7.47	6.88
3	3.22	5.12	0.43	7.52	6.87
average	3.26	5.23	0.44	7.47	6.91
SD	± 0.06	± 0.12	± 0.01	± 0.05	± 0.06

ตารางที่ ก-8 แสดงลักษณะการคงรูปของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20/Gly10

ครั้งที่	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H-M_L$ (dN.m)
1	3.71	5.52	0.20	7.87	7.68
2	3.87	5.68	0.19	7.63	7.44
3	3.75	5.66	0.22	7.58	7.54
average	3.78	5.62	0.20	7.69	7.55
SD	± 0.08	± 0.09	± 0.02	± 0.16	± 0.12

ตารางที่ ก-9 แสดงลักษณะการคงรูปของแผ่นฟิล์ม NR/PS 70/30/Gly10

ครั้งที่	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H-M_L$ (dN.m)
1	4.34	5.66	0.56	8.43	7.87
2	3.93	5.14	0.53	8.15	7.62
3	3.95	5.56	0.54	8.36	7.65
average	4.07	5.45	0.54	8.31	7.71
SD	$\pm 0.23$	$\pm 0.28$	$\pm 0.02$	$\pm 0.15$	$\pm 0.14$

ตารางที่ ก-10 แสดงลักษณะการคงรูปของแผ่นฟิล์ม NR/PS 60/40/Gly10

ครั้งที่	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H-M_L$ (dN.m)
1	3.94	5.10	0.68	7.86	7.18
2	3.97	5.26	0.66	7.77	7.26
3	3.96	5.33	0.53	7.84	7.21
average	3.96	5.23	0.62	7.82	7.22
SD	$\pm 0.02$	$\pm 0.12$	$\pm 0.08$	$\pm 0.05$	$\pm 0.04$

ตารางที่ ก-11 แสดงลักษณะการคงรูปของแผ่นฟิล์ม NR/PS 50/50/Gly10

ครั้งที่	$t_{s2}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H-M_L$ (dN.m)
1	3.46	4.32	0.34	6.74	6.41
2	3.81	4.91	0.24	8.04	7.87
3	3.53	4.46	0.22	7.98	6.54
average	3.60	4.56	0.27	7.59	6.94
SD	$\pm 0.19$	$\pm 0.31$	$\pm 0.06$	$\pm 0.73$	$\pm 0.81$

## ภาคผนวก ข

สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลจาก  
การเตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing

ตารางที่ ข-1 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 100/0

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.59	0.61	3.67
2	0.58	0.59	3.23
3	0.56	0.58	3.55
4	0.60	0.61	3.36
5	0.57	0.59	3.26
Average $\pm$ SD			3.41 $\pm$ 0.19

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.63	0.66	4.60
2	0.60	0.63	4.51
3	0.60	0.62	4.59
4	0.62	0.65	4.64
5	0.63	0.65	4.41
average $\pm$ SD			4.55 $\pm$ 0.08

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.63	0.68	6.73
2	0.62	0.66	6.67
3	0.59	0.63	6.76
4	0.61	0.66	7.00
5	0.60	0.64	6.34
average $\pm$ SD			6.70 $\pm$ 0.24

ตารางที่ ข-4 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 70/30

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.62	0.69	10.10
2	0.66	0.72	10.25
3	0.61	0.68	10.14
4	0.65	0.73	10.97
5	0.64	0.70	10.13
average $\pm$ SD			10.32 $\pm$ 0.33

ตารางที่ ข-5 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 60/40

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.67	0.79	17.83
2	0.67	0.78	17.59
3	0.69	0.82	17.83
4	0.64	0.75	17.52
5	0.68	0.79	17.27
average $\pm$ SD			17.61 $\pm$ 0.21

ตารางที่ ข-6 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 50/50

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.71	0.94	32.23
2	0.64	0.85	32.03
3	0.68	0.90	32.76
4	0.66	0.87	32.23
5	0.68	0.90	32.50
average $\pm$ SD			32.35 $\pm$ 0.25



ตารางที่ ข-7 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10/Gly10

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.61	0.63	4.49
2	0.63	0.66	4.88
3	0.62	0.65	4.90
4	0.63	0.66	4.51
5	0.58	0.61	4.31
average $\pm$ SD			4.62 $\pm$ 0.26

ตารางที่ ข-8 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20/Gly10

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.62	0.67	8.60
2	0.60	0.65	8.60
3	0.61	0.66	8.12
4	0.62	0.67	8.61
5	0.62	0.67	8.59
average $\pm$ SD			8.50 $\pm$ 0.21

ตารางที่ ข-9 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 70/30/Gly10

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.62	0.72	15.97
2	0.64	0.75	16.63
3	0.65	0.75	15.70
4	0.65	0.76	15.67
5	0.68	0.79	16.00
average $\pm$ SD			15.99 $\pm$ 0.39

ตารางที่ ข-10 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 60/40/Gly10

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.65	0.83	27.59
2	0.65	0.82	27.14
3	0.67	0.85	27.23
4	0.67	0.85	27.30
5	0.68	0.86	27.19
average $\pm$ SD			27.29 $\pm$ 0.18

ตารางที่ ข-11 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 50/50/Gly10

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.70	0.95	36.10
2	0.67	0.90	35.19
3	0.70	0.95	36.29
4	0.66	0.90	36.26
5	0.64	0.87	36.56
average $\pm$ SD			36.08 $\pm$ 0.52

สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ จากการเตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing

ตารางที่ ข-12 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 100/0

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.63	0.65	3.17
2	0.60	0.62	3.41
3	0.61	0.63	3.07
4	0.61	0.63	3.15
5	0.59	0.61	3.58
average $\pm$ SD			3.28 $\pm$ 0.21

ตารางที่ ข-13 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.64	0.67	4.37
2	0.59	0.61	4.13
3	0.62	0.64	4.45
4	0.65	0.67	3.95
5	0.60	0.63	4.31
average $\pm$ SD			4.24 $\pm$ 0.18

ตารางที่ ข-14 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.65	0.68	5.51
2	0.65	0.69	5.87
3	0.63	0.66	5.77
4	0.67	0.71	5.46
5	0.62	0.66	5.80
average $\pm$ SD			5.68 $\pm$ 0.19

ตารางที่ ข-15 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 70/30

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.61	0.67	9.89
2	0.64	0.70	9.40
3	0.69	0.75	9.48
4	0.61	0.67	9.93
5	0.65	0.71	9.79
average $\pm$ SD			9.70 $\pm$ 0.22

ตารางที่ ข-16 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 60/40

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.62	0.72	16.12
2	0.65	0.75	16.16
3	0.71	0.82	16.79
4	0.67	0.78	16.94
5	0.64	0.75	16.66
average $\pm$ SD			16.53 $\pm$ 0.33

ตารางที่ ข-17 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 50/50

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.68	0.88	27.95
2	0.73	0.92	26.18
3	0.74	0.93	25.01
4	0.67	0.86	28.29
5	0.70	0.88	25.50
average $\pm$ SD			26.59 $\pm$ 1.31

ตารางที่ ข-18 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10/Gly10

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.65	0.68	4.60
2	0.63	0.66	4.70
3	0.62	0.65	4.74
4	0.62	0.65	4.66
5	0.60	0.62	4.46
average $\pm$ SD			4.63 $\pm$ 0.11

ตารางที่ ข-19 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20/Gly10

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.64	0.69	7.09
2	0.65	0.70	7.45
3	0.64	0.69	7.76
4	0.62	0.67	7.11
5	0.63	0.68	7.24
average $\pm$ SD			7.33 $\pm$ 0.28

ตารางที่ ข-20 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 70/30/Gly10

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.65	0.73	12.19
2	0.62	0.70	12.28
3	0.63	0.70	12.25
4	0.66	0.75	12.42
5	0.65	0.73	12.36
average $\pm$ SD			12.30 $\pm$ 0.09

ตารางที่ ข-21 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 60/40/Gly10

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.66	0.80	21.01
2	0.67	0.80	20.30
3	0.67	0.80	20.28
4	0.65	0.79	20.78
5	0.70	0.84	20.03
average $\pm$ SD			20.48 $\pm$ 0.40

ตารางที่ ข-22 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 50/50/Gly10

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.69	0.95	37.53
2	0.68	0.94	37.13
3	0.68	0.94	37.62
4	0.68	0.92	36.96
5	0.67	0.92	37.03
average $\pm$ SD			37.25 $\pm$ 0.30



ตารางที่ ข-23 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10/Si69 10

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.56	0.61	10.17
2	0.57	0.60	5.38
3	0.56	0.60	8.24
4	0.57	0.59	4.64
5	0.55	0.61	11.97
average $\pm$ SD			8.08 $\pm$ 3.11

ตารางที่ ข-24 แสดงค่าการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20/Si69 10

sample	ก่อนแช่ ( $w_1$ )	หลังแช่ ( $w_2$ )	water absorption (%)
1	0.58	0.67	14.95
2	0.59	0.66	11.30
3	0.58	0.66	14.10
4	0.57	0.64	12.41
5	0.59	0.64	8.63
average $\pm$ SD			12.28 $\pm$ 2.49

## ภาคผนวก ค

สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล จากการเตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing

ตารางที่ ค-1 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 100/0

ครั้งที่	Elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1023	25.16	78.28
2	1046	23.80	77.18
3	1073	27.55	76.03
4	1038	23.61	77.44
5	1035	21.00	76.56
average	1043	24.23	77.10
SD	± 19	± 2.39	± 0.86

ตารางที่ ค-2 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1052	18.79	64.67
2	1063	18.04	68.47
3	1036	19.42	68.83
4	1039	17.35	65.34
5	1052	21.39	75.77
average	1049	19.00	68.62
SD	± 11	± 1.55	± 3.94

ตารางที่ ค-3 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1271	15.98	62.47
2	1297	15.22	65.72
3	1271	14.73	61.87
4	1267	15.81	59.85
5	1226	15.49	63.61
average	1266	15.44	62.70
SD	± 26	± 0.50	± 1.94

ตารางที่ ค-4 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 70/30

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1221	9.38	39.52
2	1215	9.60	55.88
3	1212	10.02	41.78
4	1219	9.25	52.53
5	1227	9.57	55.38
average	1219	9.56	49.02
SD	± 6	± 0.29	± 6.96

ตารางที่ ค-5 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 60/40

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	728	4.04	35.34
2	758	4.43	39.04
3	785	4.53	37.42
4	764	4.39	36.48
5	789	4.69	35.89
average	765	4.42	36.83
SD	± 24	± 0.24	± 1.30

ตารางที่ ค-6 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 50/50

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	136	2.11	25.26
2	160	2.11	24.96
3	155	2.22	25.23
4	251	2.40	26.02
5	205	2.31	26.16
average	181	2.23	25.52
SD	± 46	± 0.13	± 0.47

ตารางที่ ค-7 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10/Gly10

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1237	19.90	74.48
2	1278	19.90	68.4
3	1222	20.335	68.05
4	1245	21.13	73.33
5	1244	20.65	57.73
average	1245	20.38	68.34
SD	± 20	± 0.52	± 6.62

ตารางที่ ค-8 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20/Gly10

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1300	15.67	65.15
2	1339	15.86	66.84
3	1318	15.04	59.85
4	1284	16.56	64.63
5	1312	15.31	65.76
average	1311	15.69	64.44
SD	± 20	± 0.58	± 2.70

ตารางที่ ค-9 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 70/30/Gly10

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1300	13.57	54.06
2	1307	13.43	53.86
3	1311	14.21	54.31
4	1313	13.76	55.48
5	1309	12.43	51.23
average	1308	13.48	53.79
SD	± 5	± 0.66	± 1.56

ตารางที่ ค-10 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 60/40/Gly10

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1089	6.21	39.49
2	1025	5.46	43.09
3	1046	4.81	42.67
4	1036	4.50	42.23
5	1025	4.86	41.59
average	1040	5.17	41.81
SD	± 26	± 0.68	± 1.41

ตารางที่ ค-11 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 50/50/Gly10

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	557	3.22	26.81
2	508	2.41	25.23
3	537	3.11	26.71
4	535	3.14	26.20
5	584	3.38	28.49
average	544	3.05	26.69
SD	± 28	± 0.37	± 1.19

สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ จากการเตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing

ตารางที่ ค-12 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 100/0

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1363	24.87	82.41
2	1409	28.36	85.96
3	1419	28.00	80.92
4	1280	25.63	87.84
5	1294	26.25	88.18
average	1353	26.62	85.06
SD	± 64	± 1.51	± 3.26

ตารางที่ ค-13 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1266	16.80	67.02
2	1192	18.43	74.46
3	1178	18.55	74.27
4	1192	17.76	76.59
5	1159	18.55	78.86
average	1198	18.02	74.24
SD	± 36	± 0.68	± 3.98

ตารางที่ ค-14 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1238	15.23	71.66
2	1266	15.09	67.72
3	1261	16.46	65.96
4	1269	15.46	71.26
5	1251	14.41	73.35
average	1257	15.33	69.99
SD	± 13	± 0.74	± 2.72



ตารางที่ ค-15 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 70/30

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1124	8.22	51.70
2	1173	9.47	48.60
3	1198	9.66	48.88
4	1155	8.31	45.49
5	1172	8.87	56.29
average	1164	8.90	50.19
SD	± 24	± 0.59	± 3.63

ตารางที่ ค-16 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 60/40

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1119	6.77	44.62
2	1044	6.02	44.31
3	1168	7.36	42.73
4	1135	7.02	44.84
5	1142	7.24	40.68
average	1122	6.88	43.44
SD	± 42	± 0.48	± 1.56

ตารางที่ ค-17 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 50/50

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1021	4.56	27.68
2	974	4.27	29.19
3	978	4.49	25.27
4	1037	4.29	23.63
5	1054	4.50	27.79
average	1013	4.42	26.71
SD	± 32	± 0.12	± 1.99

ตารางที่ ค-18 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10/Gly10

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1343	19.04	84.08
2	1349	20.90	77.46
3	1344	19.88	75.38
4	1348	19.64	75.60
5	1358	19.62	82.70
average	1348	19.82	79.04
SD	± 6	± 0.68	± 4.08

ตารางที่ ค-19 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20/Gly10

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1334	18.00	75.12
2	1321	17.09	72.54
3	1329	17.41	68.77
4	1338	17.02	75.36
5	1342	17.08	63.66
average	1333	17.32	71.09
SD	± 8	± 0.41	± 4.93

ตารางที่ ค-20 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 70/30/Gly10

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1393	14.25	52.55
2	1391	14.70	55.20
3	1400	14.56	54.02
4	1415	14.28	51.69
5	1386	14.37	52.39
average	1397	14.43	53.17
SD	± 11	± 0.19	± 1.42

ตารางที่ ค-21 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 60/40/Gly10

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1354	8.71	45.62
2	1409	8.60	44.82
3	1407	8.50	45.23
4	1405	8.11	44.74
5	1392	8.50	47.15
average	1393	8.48	45.51
SD	± 23	± 0.23	± 0.98

ตารางที่ ค-22 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 50/50/Gly10

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1514	6.79	29.29
2	1526	7.09	30.30
3	1482	6.52	30.28
4	1508	6.96	32.21
5	1527	6.80	30.63
average	1511	6.83	30.54
SD	± 18	± 0.21	± 1.06

ตารางที่ ค-23 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10/Si69 10

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1059	22.08	67.59
2	1185	24.77	68.22
3	1017	20.45	66.04
4	1046	21.06	65.34
5	1017	22.04	69.22
average	1065	22.08	67.28
SD	± 70.00	± 1.65	± 1.58

ตารางที่ ค-24 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20/Si 69 10 phr

ครั้งที่	elongation (%)	tensile strength (MPa)	tear strength (N/mm)
1	1060	18.09	55.34
2	1052	19.84	56.66
3	1071	23.67	54.73
4	1060	17.55	56.98
5	1071	18.56	54.76
average	1063	19.54	55.69
SD	± 8.09	± 2.20	± 0.95

## ภาคผนวก ง

สมบัติความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล  
จากการเตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing

ตารางที่ ง-1 แสดงค่าความแข็งของแผ่นฟิล์ม NR/PS ที่มีและไม่มีกลีเซอรอล

sample	hardness (shore A)					average (shore A) $\pm$ SD
	1	2	3	4	5	
100/0	51	50	52	49	50	50 $\pm$ 1.14
90/10	56	56	57	56	55	56 $\pm$ 0.71
80/20	59	58	60	57	61	59 $\pm$ 1.58
70/30	60	59	61	59	61	60 $\pm$ 1.00
60/40	68	68	67	69	68	68 $\pm$ 0.71
50/50	82	83	81	82	8	82 $\pm$ 0.20
90/10/Gly10	56	55	55	54	55	55 $\pm$ 0.71
80/20/Gly10	56	56	57	55	56	56 $\pm$ 0.41
70/30/Gly10	59	60	59	58	59	59 $\pm$ 0.71
60/40/Gly10	63	62	65	65	65	64 $\pm$ 1.41
50/50/Gly10	75	74	76	75	75	75 $\pm$ 0.71

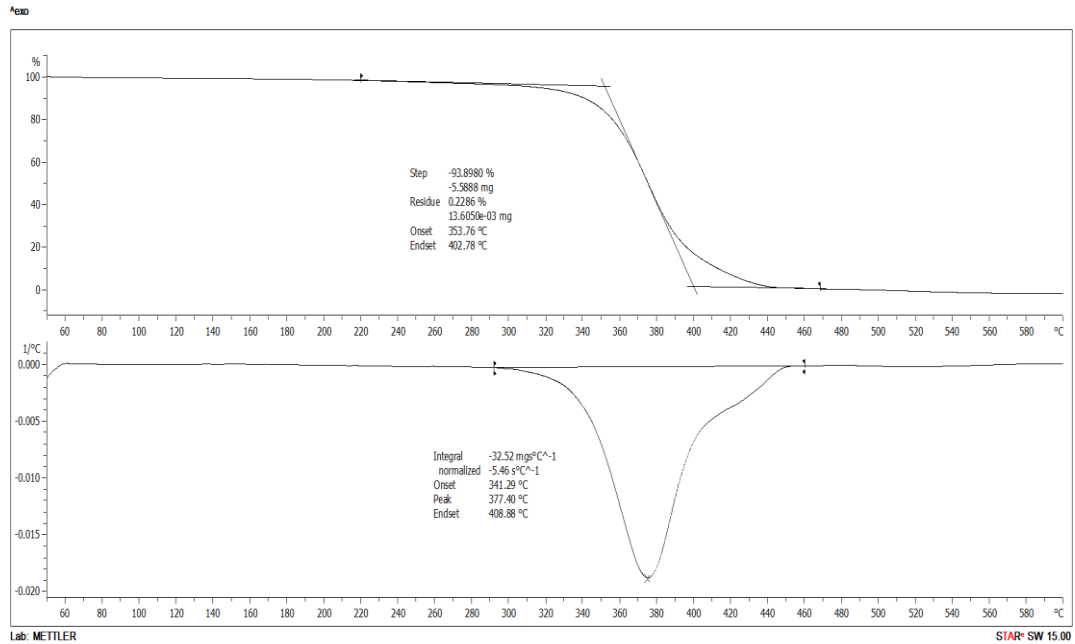
สมบัติความแข็งของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอล  
จากการเตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing

ตารางที่ ง-2 แสดงค่าความแข็งของแผ่นฟิล์ม NR/PS ที่มีและไม่มีกลีเซอรอล

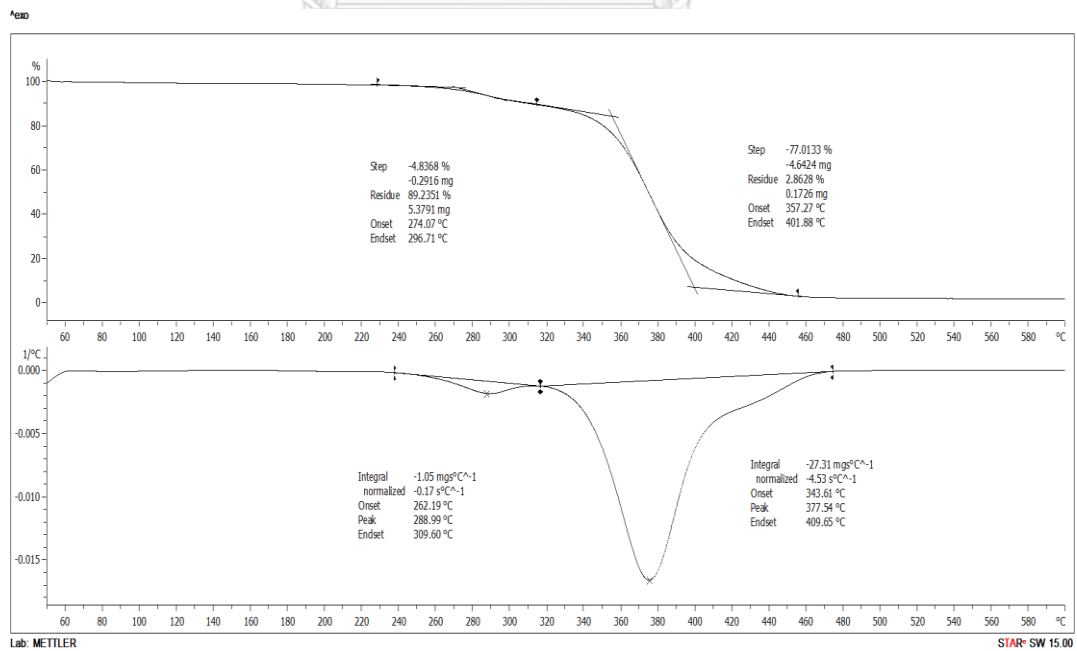
sample	hardness (shore A)					average (shore A) $\pm$ SD
	1	2	3	4	5	
100/0	51	50	53	50	51	51 $\pm$ 1.22
90/10	52	54	50	52	54	52 $\pm$ 1.67
80/20	53	55	51	54	54	53 $\pm$ 1.52
70/30	56	55	57	56	56	56 $\pm$ 0.71
60/40	60	59	62	61	63	61 $\pm$ 1.58
50/50	67	68	68	66	66	67 $\pm$ 1.00
90/10/Gly10	50	52	50	51	52	51 $\pm$ 1.00
80/20/Gly10	52	53	53	50	52	52 $\pm$ 1.22
70/30/Gly10	55	55	56	55	54	55 $\pm$ 0.71
60/40/Gly10	61	58	60	62	59	60 $\pm$ 1.58
50/50/Gly10	64	67	64	65	65	65 $\pm$ 1.22

## ภาคผนวก จ

สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติม  
กลีเซอรอล จากการเตรียมด้วยกระบวนการ latex mixing

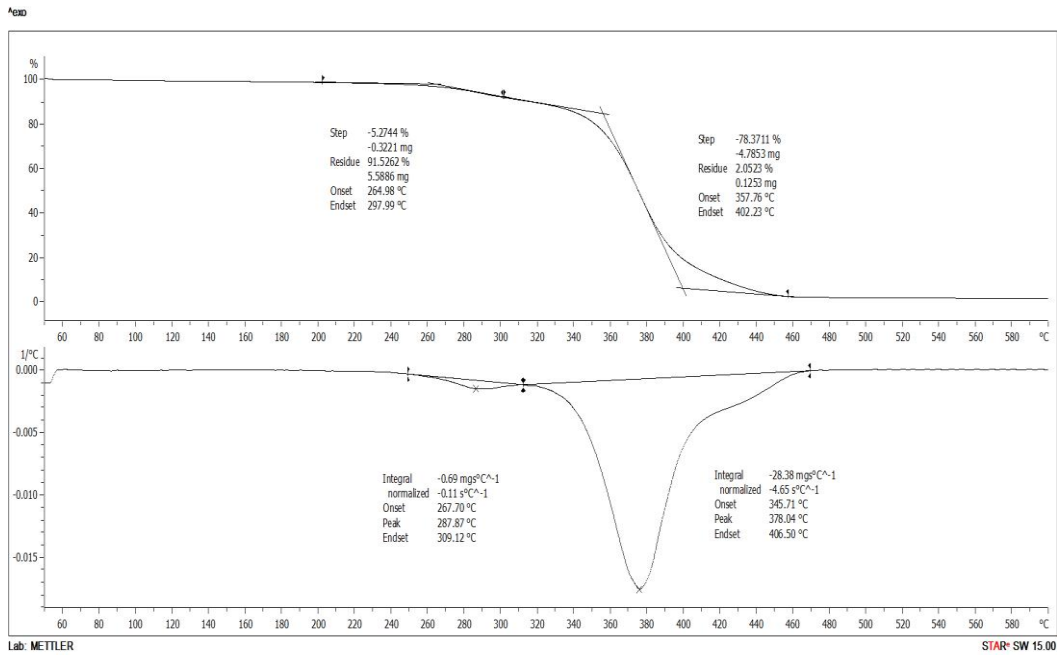


## รูปที่ จ-1 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 100/0

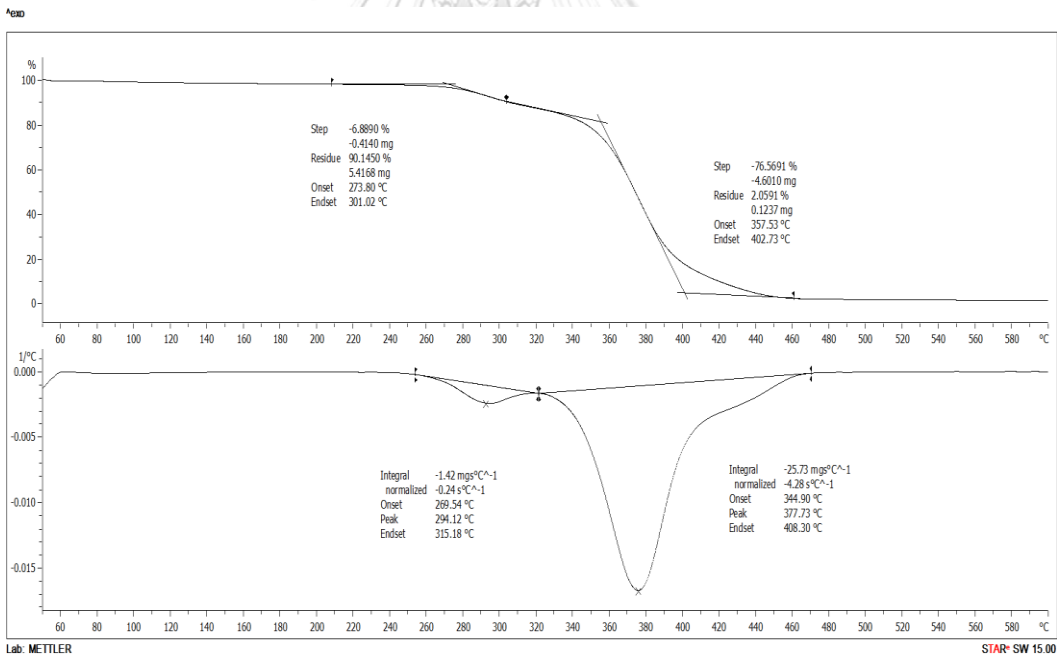


## รูปที่ จ-2 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10

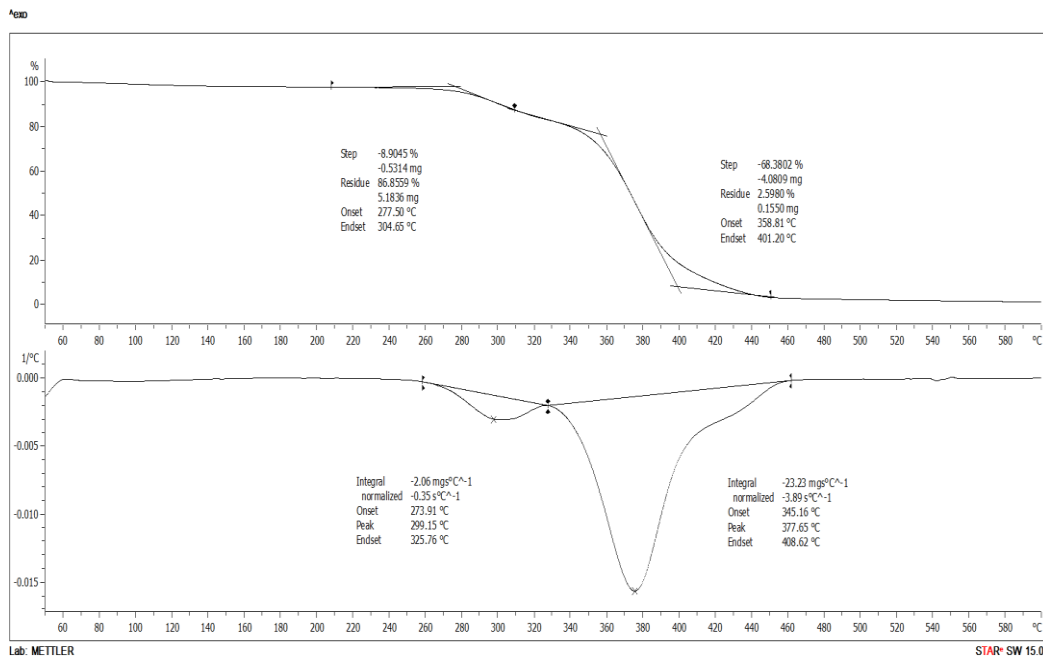




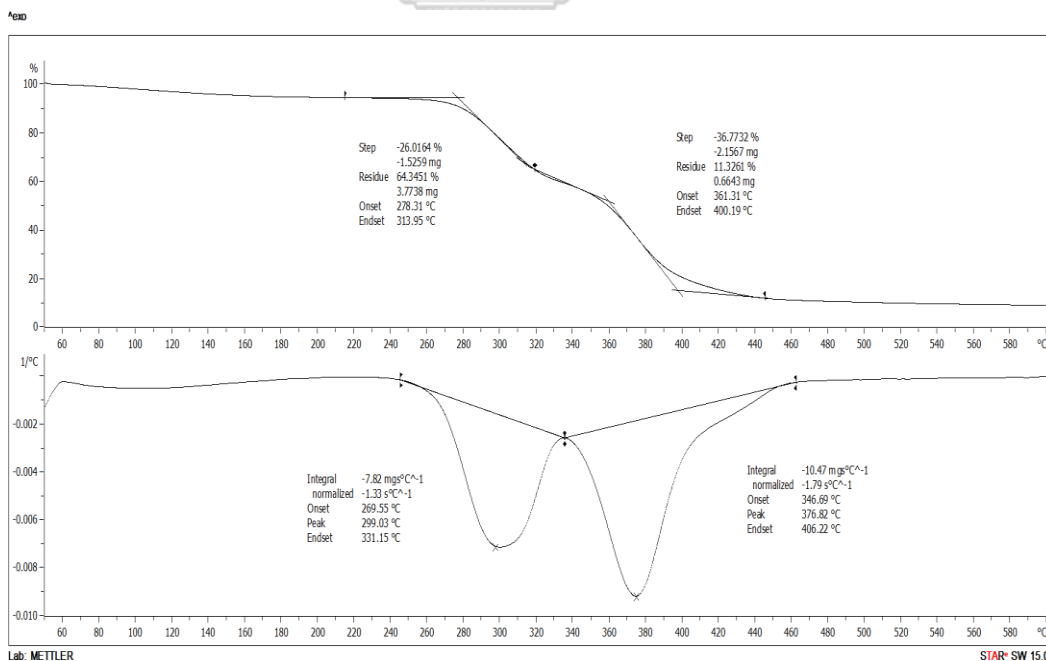
รูปที่ จ-3 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20



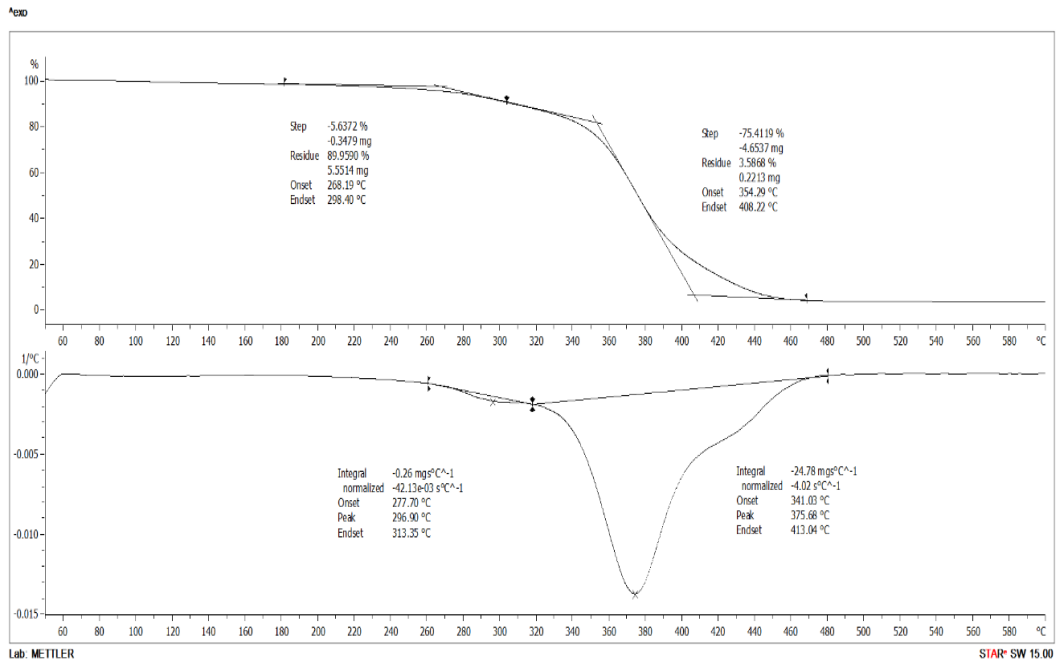
รูปที่ จ-4 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 70/30



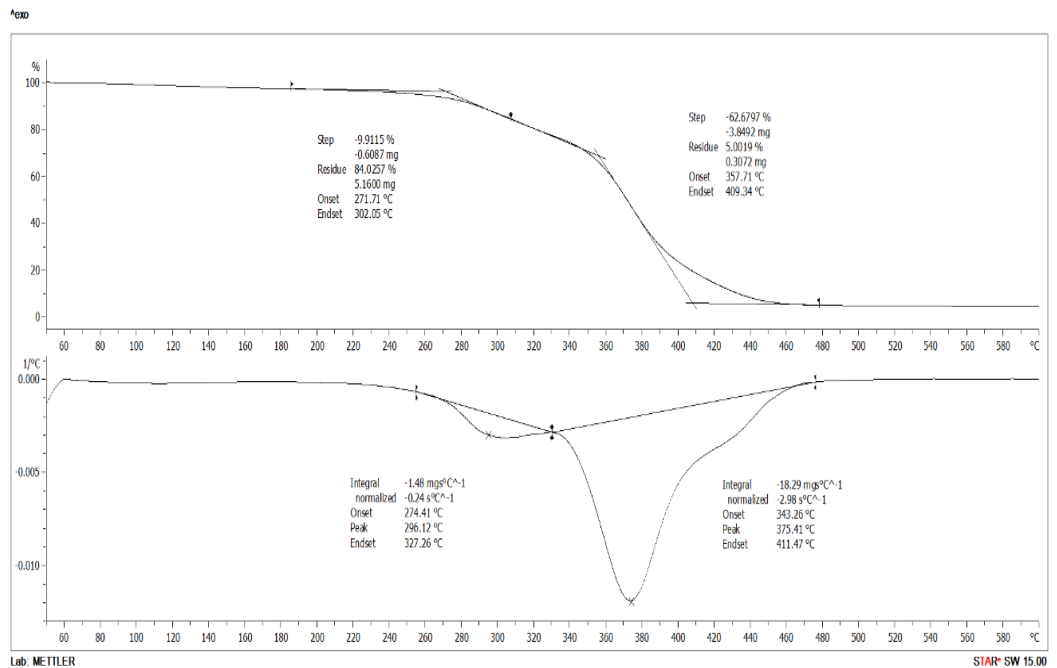
รูปที่ จ-5 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 60/40



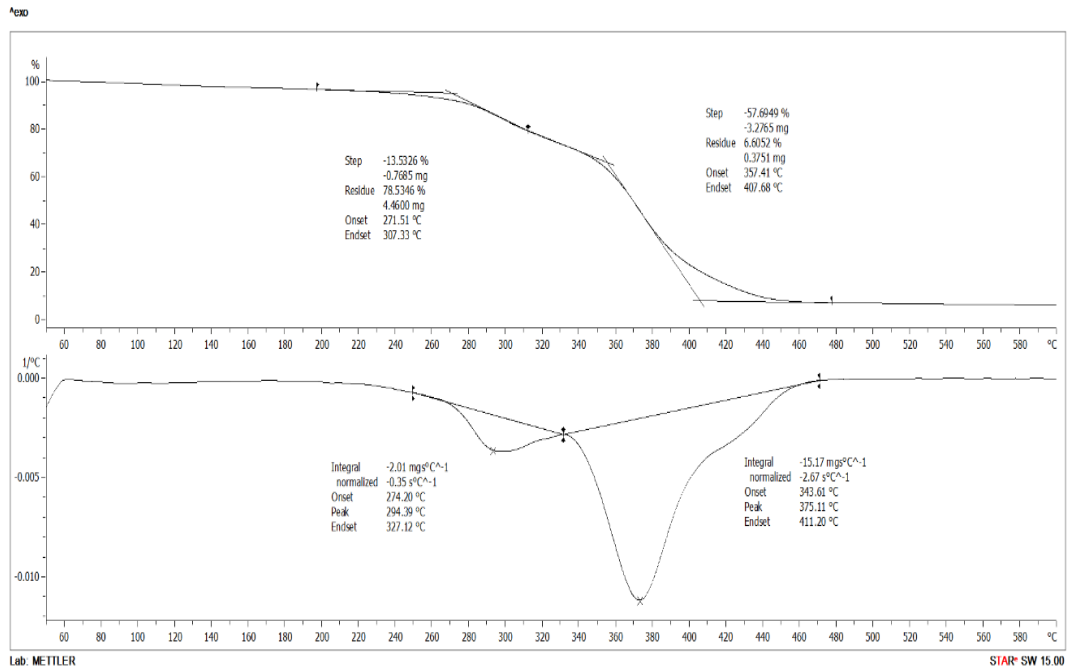
รูปที่ จ-6 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 50/50



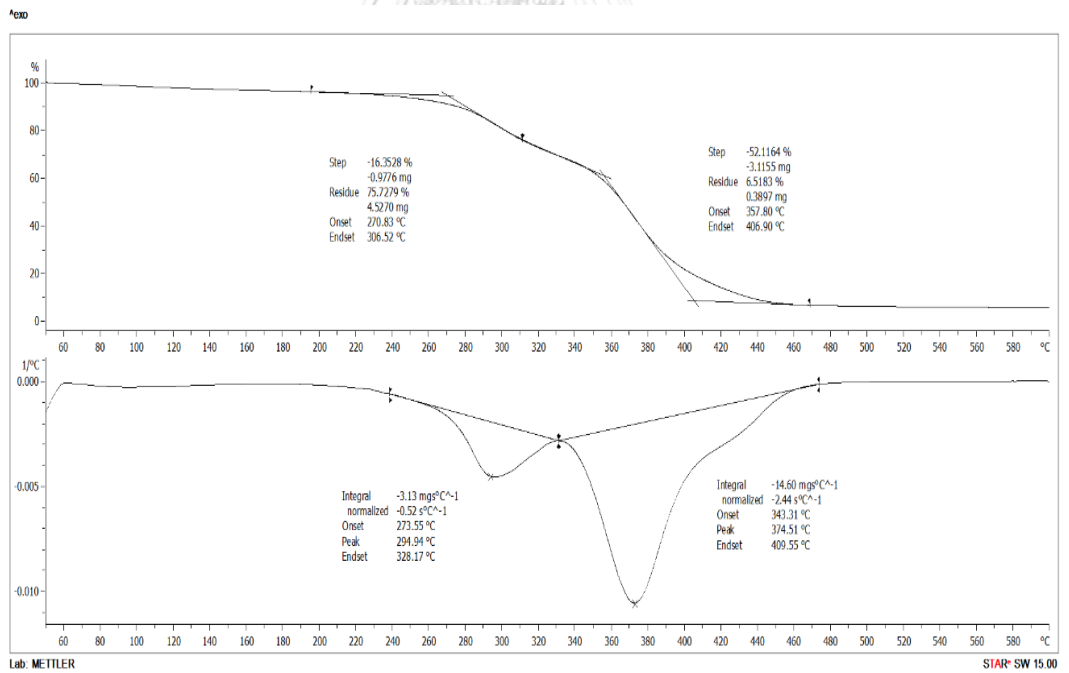
รูปที่ จ-7 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10/Gly10



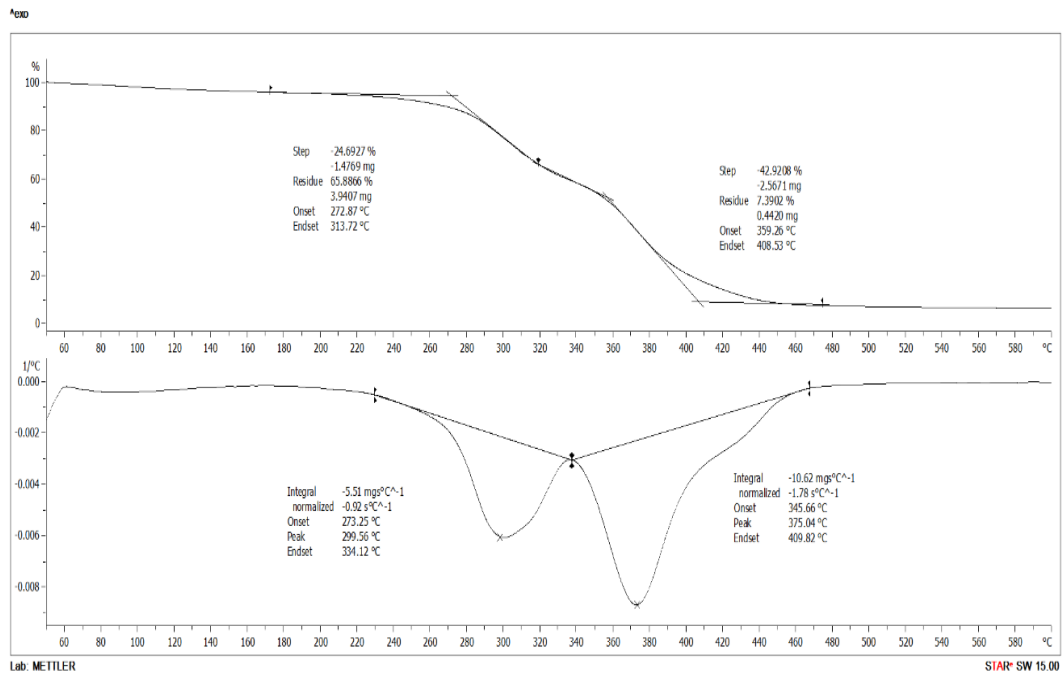
รูปที่ จ-8 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20/Gly10



รูปที่ จ-9 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 70/30/Gly10



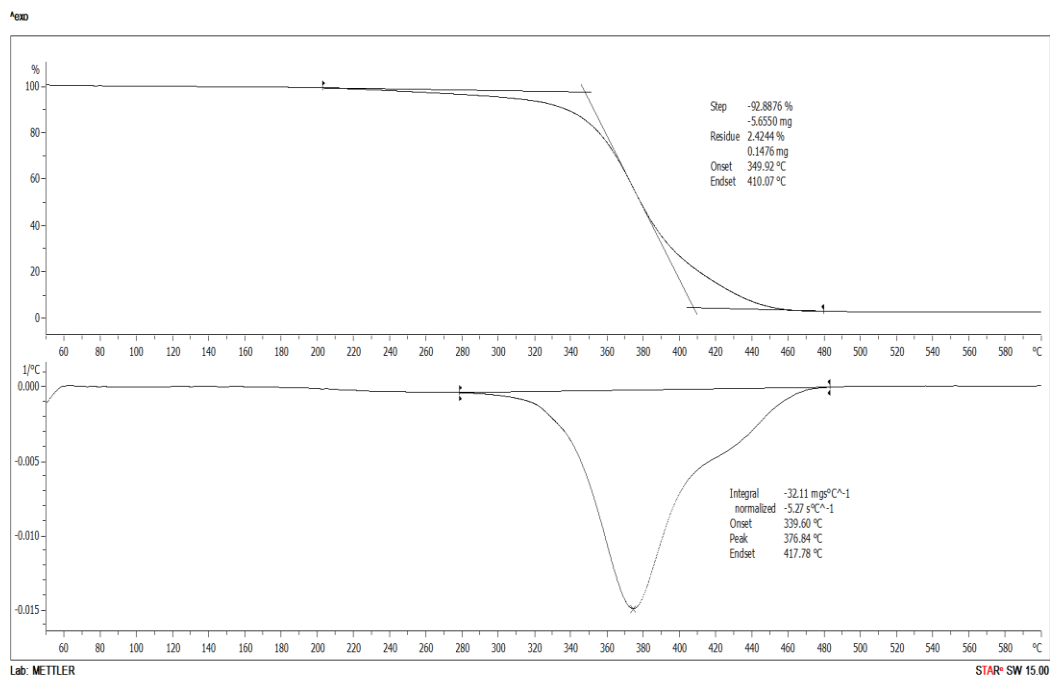
รูปที่ จ-10 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 60/40/Gly10



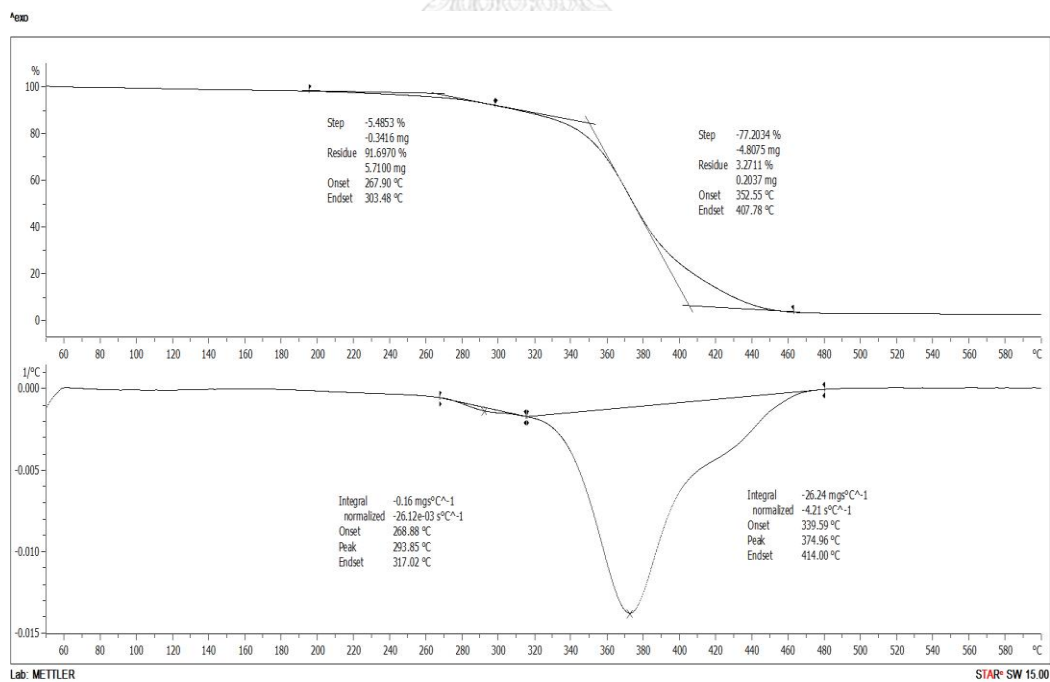
รูปที่ จ-11 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 50/50/Gly10



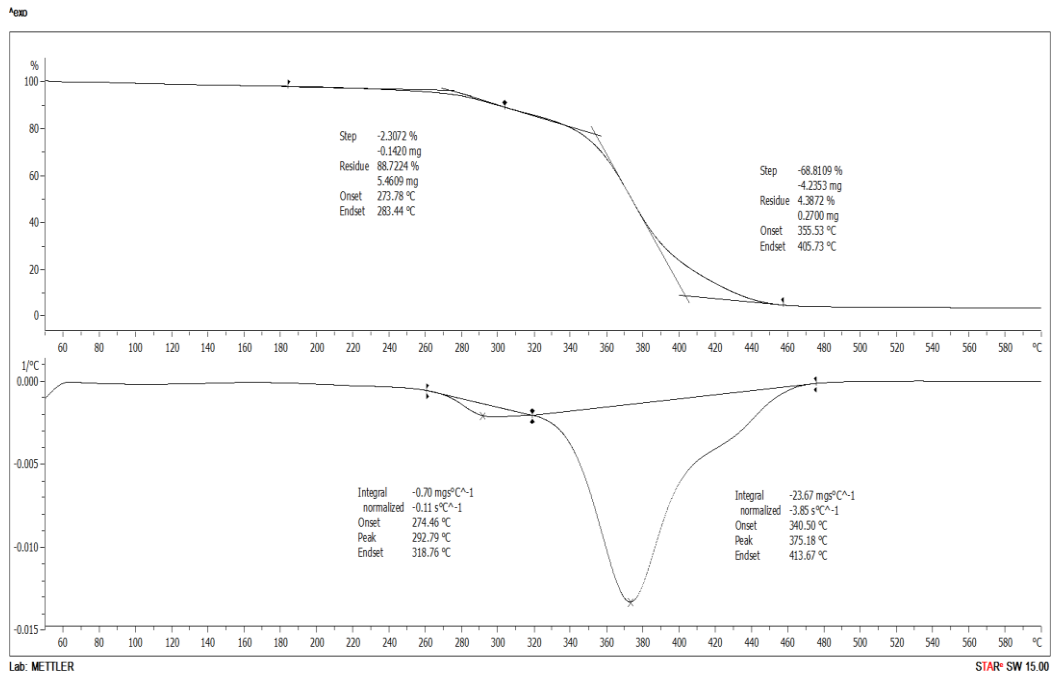
สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสมแป้งมันฝรั่งทั้งที่เติมและไม่เติม  
กลีเซอรอล จากการเตรียมด้วยกระบวนการ dry mixing



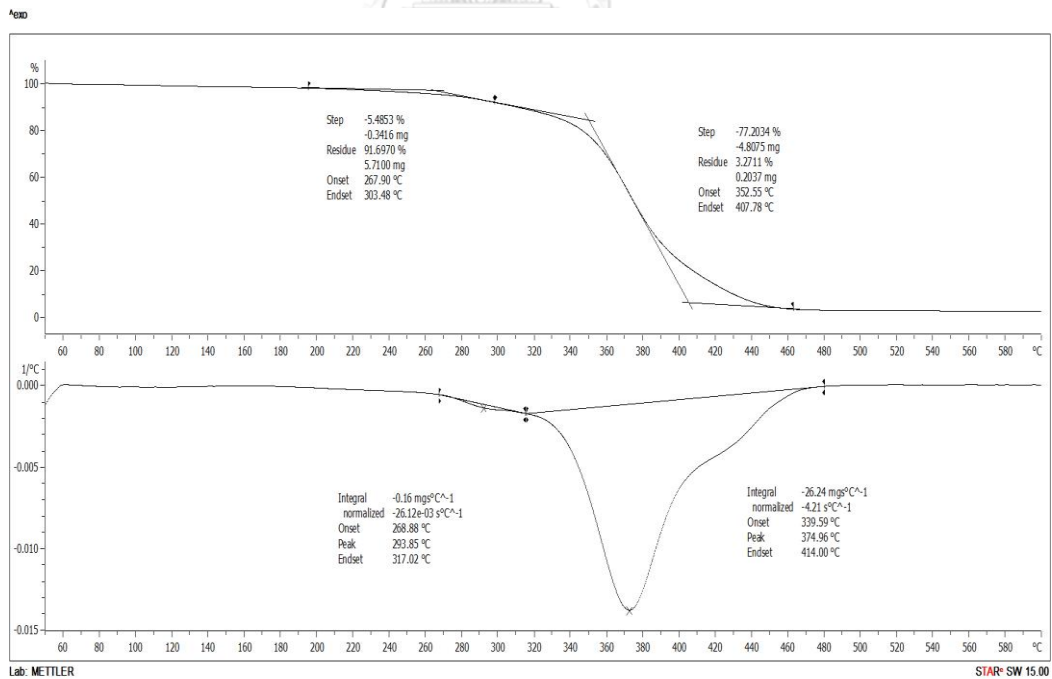
รูปที่ จ-12 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 100/0



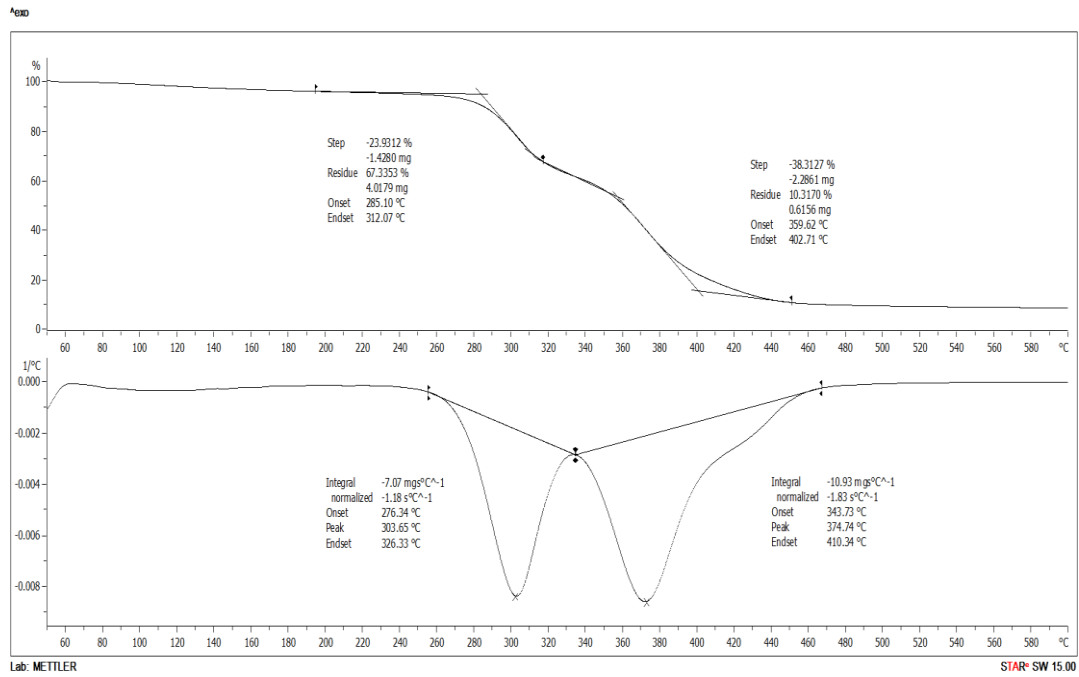
รูปที่ จ-13 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10



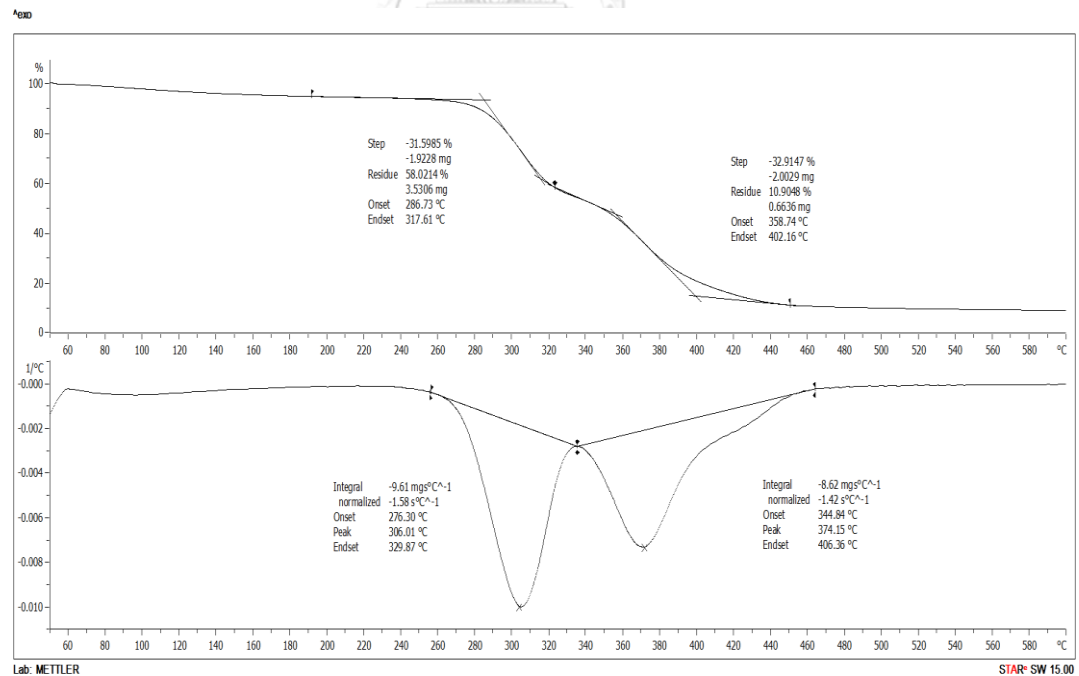
รูปที่ จ-14 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20



รูปที่ จ-15 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 70/30

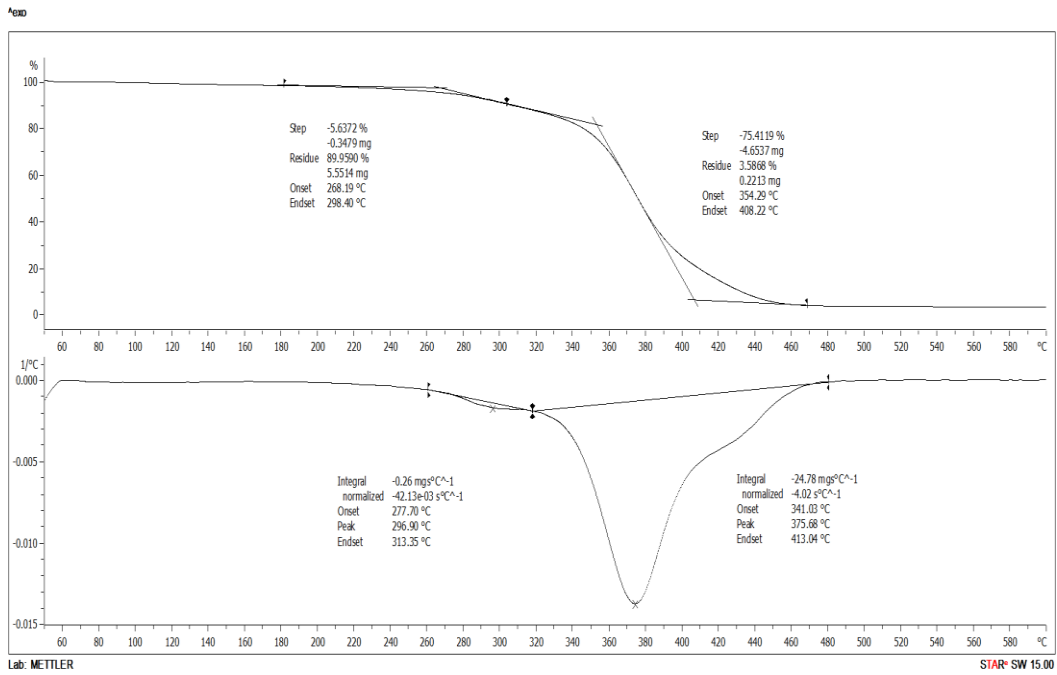


รูปที่ จ-16 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 60/40

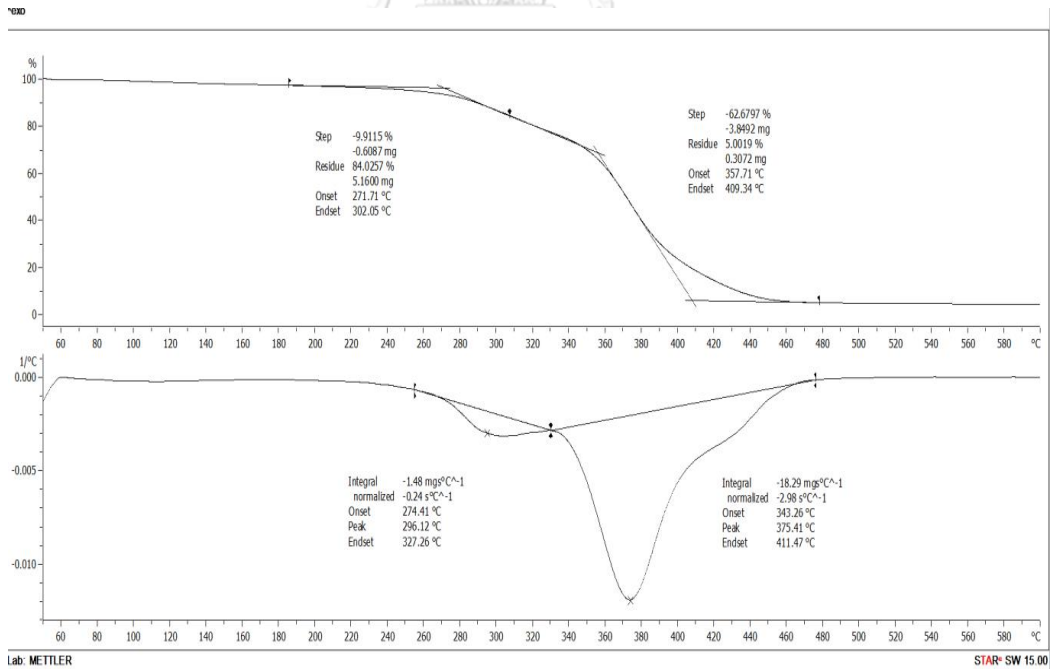


รูปที่ จ-17 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 50/50

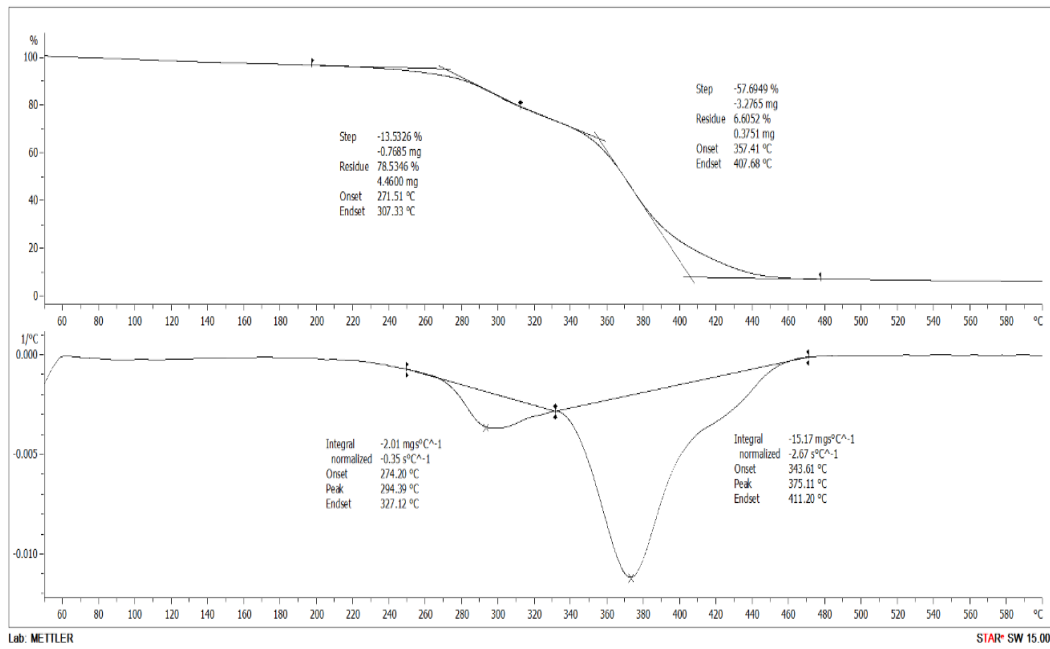




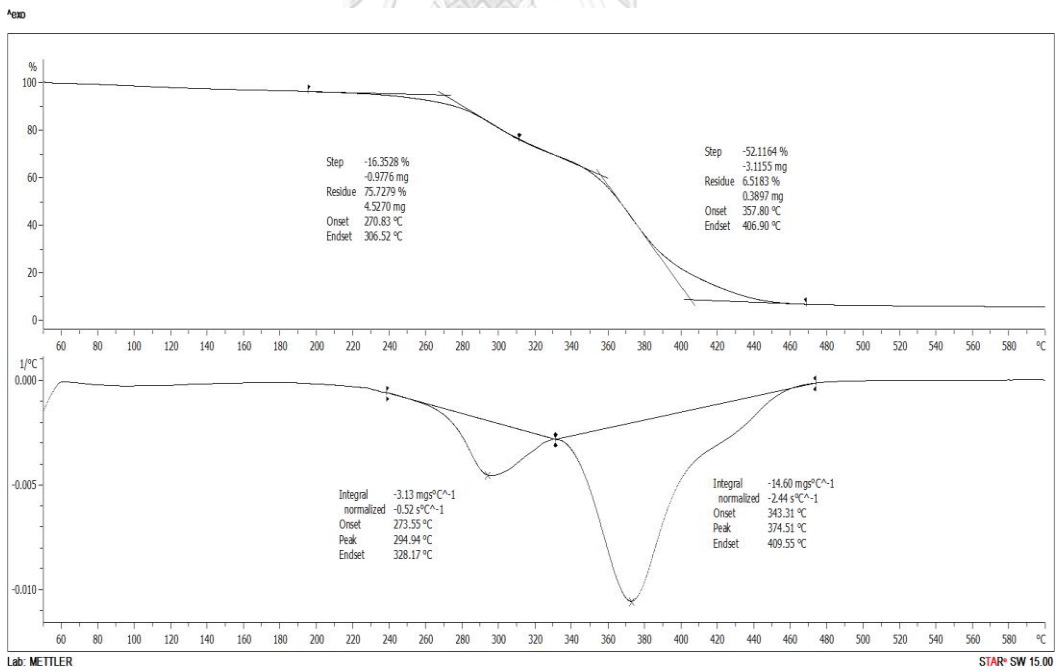
รูปที่ จ-18 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 90/10/Gly10



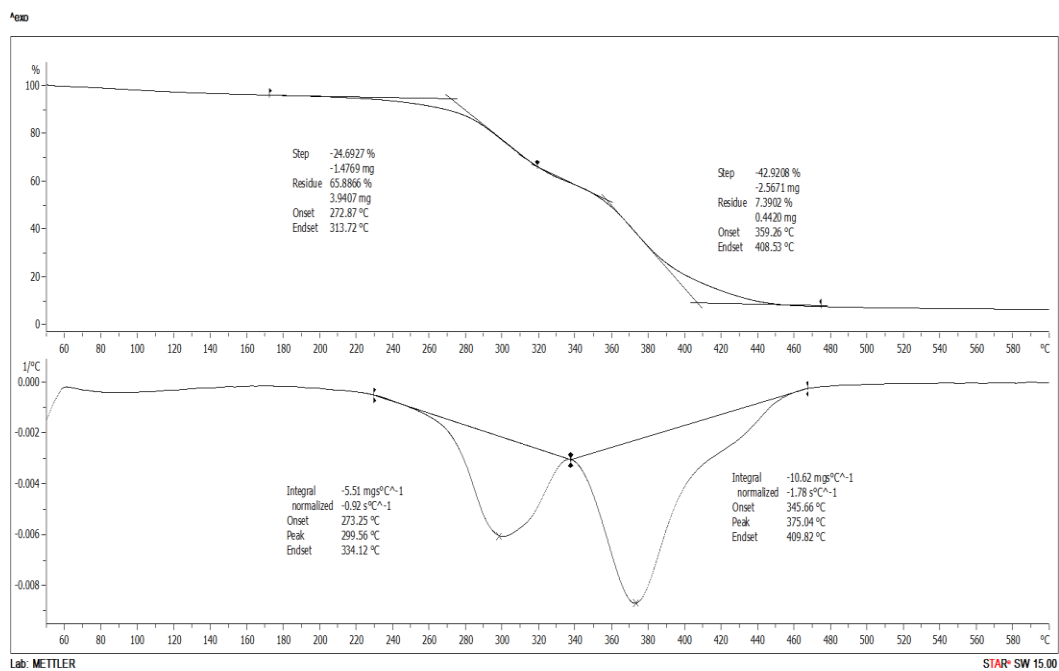
รูปที่ จ-19 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 80/20/Gly10



รูปที่ จ-20 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 70/30/Gly10



รูปที่ จ-21 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 60/40/Gly10



รูปที่ จ-22 TGA ของแผ่นฟิล์ม NR/PS 50/50/Gly10



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวนันทรี ฉัตรยาลักษณ์
วัน เดือน ปี เกิด	8 กันยายน 2534
สถานที่เกิด	ต.ท่าพี่เลี้ยง อ.เมือง จ.สุพรรณบุรี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	165/2 ถ.เนรมแก้ว ต.ท่าระหัด อ.เมือง จ.สุพรรณบุรี
ผลงานตีพิมพ์	นำเสนอผลงานประเภท Oral Presentation ในหัวข้อ "Preparation of Water Absorbable Film from Natural Rubber Filled with Potato Starch" ในการประชุม The 50th National Graduate Research Conference (NGRC2020) จัดโดย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ในวันที่ 6-7 มิถุนายน 2563