



การปรับปรุงสมบัติทางกลและความสามารถในการขึ้นรูปของ
พลาสติกชีวภาพที่ทำมาจากโปรตีนกลูเตนโดยการใช้ยางธรรมชาติ
Improvement of Mechanical Properties and
Processibility of Gluten Protein by Using Natural Rubber

กัลทิมา เชาวชาญชัยกุล

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๐
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงความทนต่อแรงกระแทก และความสามารถในการขึ้นรูปของ
กลูเตนจากข้าวสาลี (WG) โดยการเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR) เปรียบเทียบกับกลีเซอรอล ในงานวิจัย
นี้ได้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาหาปริมาณยาง ENR ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุง WG
และผลการทำงานร่วมกันระหว่าง ENR และกลีเซอรอลที่มีต่อสมบัติของ WG ชิ้นงานทดสอบถูกผสมและ
เตรียมชิ้นงานด้วยเครื่องผสมระบบปิด และเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความดัน ตามลำดับ ยาง ENR และกลี
เซอรอลถูกปรับเปลี่ยนปริมาณตั้งแต่ 10 ถึง 40 phr ผลของชนิดและปริมาณสารปรับปรุงที่มีต่อ WG ถูก
ประเมินด้วยการทดสอบแรงดึง แรงกระแทก และการดูดซึมน้ำ และการวิเคราะห์ทางความร้อน พฤติกรรม
การแตกหักและการกระจายตัวของยางถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของยาง ENR หรือกลีเซอรอลส่งผลให้เกิดการลดลงของค่ามอดูลัสและ
ความต้านทานแรงดึง ยกเว้นกรณีปริมาณสารปรับปรุง 10 phr ในขณะที่ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดและความ
ต้านทานแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ WG ที่ผ่านการ
ปรับปรุงมีแนวโน้มลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของปริมาณยาง ENR หรือกลีเซอรอล โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีกลี
เซอรอล การมีอยู่ของกลีเซอรอลมีผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อน (T_d) แต่ในกรณี
ของการเติมยาง ENR ไม่พบการเปลี่ยนแปลง ความทนต่อน้ำของชิ้นงาน WG ถูกปรับปรุงโดยการมีอยู่ของ
ยาง ENR ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของกลีเซอรอลนำไปสู่การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงาน ณ เวลาในการแช่ชิ้นงาน
ที่ 2880 นาที สำหรับผลของสัดส่วนยาง ENR และกลีเซอรอล พบว่า กลีเซอรอลมีส่วนในการช่วยเสริมความ
ทนต่อแรงดึง แต่ลดความทนต่อแรงกระแทกและความทนต่อน้ำของ WG ที่ถูกปรับปรุงด้วยยาง ENR
ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคยาง ENR ถูกปรับปรุงด้วยการเติมกลีเซอรอล ค่า T_g และ T_d ของ WG
ที่ถูกปรับปรุงด้วยยาง ENR เพิ่มสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนของยาง ENR มีปริมาณมากขึ้น

คำสำคัญ: พลาสติคชีวภาพ/ยางธรรมชาติ/กลูเตน/สมบัติทางกล/พลาสติไซเซอร์

Abstract

The aims of this research work were to enhance the impact resistance and processibility of wheat gluten (WG) by the addition of epoxidized natural rubber (ENR) compared to glycerol. This work was divided into two parts: to study the optimum ENR content for improvement of WG and the effect of together functions between ENR and glycerol on the properties of WG. Tested specimens were mixed and prepared by internal mixer and compression molding machine, respectively. ENR and glycerol were varied from 10 to 40 phr. The effects of modifier types and contents on WG were evaluated by tensile, impact and water absorption testing and thermal analysis. Fracture behavior and rubber dispersion were investigated with scanning electron microscope (SEM). The result revealed that the increase of ENR or Glycerol contents led to the decreases in tensile modulus and strength except for modifier content of 10 phr, whereas elongation at break and impact strength increased. Glass transition temperature (T_g) of modified WG tended to decrease with the increase of ENR or glycerol contents, especially for glycerol. The presence of glycerol affected on the decomposition temperature (T_d) values but those were unchanged for case of ENR. Water resistant of WG specimen was improved by the presence of ENR whereas the increase of glycerol led to weight loss at immersion time of 2880 min. For the effect of ENR : glycerol ratios, it indicated that glycerol enhanced tensile resistances but suppressed impact and water resistances of modified WG by ENR. Sizes and dispersion of ENR particles were improved by the addition of glycerol. T_g and T_d values of modified WG by ENR and glycerol increased when ENR fractions were increased.

Keywords: Bioplastic/Natural rubber/Gluten/Mechanical properties/Plasticizer

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ภายใต้ทุนงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 และขอขอบคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมเครื่องกลและกระบวนการ บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตรนานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงาน

คณะวิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บัญชีตาราง	ฉ
บัญชีรูป	ช
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พลาสติกชีวภาพ	3
2.2 พลาสติกไฮเซอรัล	7
2.3 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์	9
2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	11
3. วิธีดำเนินการวิจัย	13
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	13
3.2 แผนการดำเนินการวิจัย	14
3.3 วิธีการทดลอง	15
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล	28
4.1 ผลการศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติที่ดัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติ โพรตีนกลูเตนแทนการใช้กลีเซอรัล	28
4.2 ผลการศึกษาผลของการใช้ยางธรรมชาติที่ดัดแปรผสมกับกลีเซอรัลที่มีต่อการ ปรับปรุงสมบัติของโพรตีนกลูเตน	37
5. สรุปและวิเคราะห์ผล	44

5.1 การศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติดีดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุง สมบัติโพรตีนกลูเตนแทนการใช้กลีเซอรอล	44
5.2 การศึกษาผลของการใช้ยางธรรมชาติดีดแปรผสมกับกลีเซอรอลที่มีต่อการ ปรับปรุงสมบัติของโพรตีนกลูเตน	45
เอกสารอ้างอิง	46
ประวัตินักวิจัย	49



บัญชีตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติทางกายภาพของยาง ENR เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ	11
2	สูตรยางคอมปาวด์ของยาง ENR ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พลาสติกตามประกาศ	16



บัญชีรูป

รูปที่		หน้า
1	การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้	4
2	โครงสร้างทางเคมีของซิสทีน	5
3	กลไกการเกิดพันธะการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โปรตีน	6
4	การตอบสนองของพอลิเมอร์ต่อพลาสติกไซเซอร์ตามทฤษฎีการทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น	8
5	การลดการเกิดเจลของพอลิเมอร์โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์	8
6	ปฏิกิริยาอ็อกซิเดชันที่ตัดแปรงยางธรรมชาติให้กลายเป็นยาง ENR ด้วยกรดเปอร์ฟอร์มิก	9
7	การเตรียมกรดเปอร์ฟอร์มิกจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ไซด์	9
8	ปฏิกิริยาอ็อกซิเดชันที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและกรดเปอร์แอซิดิก	10
9	สูตรโครงสร้างทางเคมีของยาง ENR-50	10
10	ผงกลูเตนจากข้าวสาลี	13
11	ยาง ENR เกรด ENR25 จากบริษัท เมืองใหม่กัททรี จำกัด (มหาชน)	14
12	แผนภาพการดำเนินงานวิจัยการศึกษาหาปริมาณยาง ENR ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติโปรตีนกลูเตนแทนการใช้กลีเซอรอล	15
13	เครื่องผสมระบบปิด รุ่น MX75-TQ ของบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด	17
14	เครื่องอัดด้วยความดัน ยี่ห้อ Cometech รุ่น QC-601T	18
15	แม่พิมพ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง	19
16	แม่พิมพ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก	19
17	ขั้นตอนการอัดให้ความดัน	20
18	เครื่อง Cometech Universal Testing รุ่น QC-506M1 ของบริษัท Cometech ประเทศไต้หวัน	21
19	ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง	21
20	เครื่องทำรอยบาก สำหรับเตรียมชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทก	22
21	ลักษณะตัวอย่างของชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงกระแทก	22
22	เครื่อง CEAST® Resil Impactor รุ่น 6545 ของบริษัท Torino ประเทศอิตาลี	23
23	เครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer รุ่น DMA 242 E Artemis ของบริษัท NETZSCH	24
24	เครื่อง Thermogravimetric analyzer รุ่น TG 209 F3 Tarsus ของบริษัท NETZSCH	25
25	ลักษณะของชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ	25
26	ชิ้นงาน WG สูตรต่างๆ ที่ถูกแช่ในน้ำที่ผ่านกระบวนการขจัดไอออนออกจากรูน้ำ	26

รูปที่		หน้า
27	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบ SEM ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6610LV	27
28	ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณ ต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับกรณีการเติมกลีเซอรอล	28
29	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ WG เมื่อเติมยาง ENR หรือกลีเซอรอลปริมาณต่างๆ กัน	29
30	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับกรณีการเติมกลีเซอรอล	30
31	ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ณ บริเวณรอยแตกหักของชิ้นงาน WG ที่มีการกลีเซอรอล หรือยาง ENR ปริมาณ 10 และ 30 % โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทก ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	31
32	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR หรือกลีเซอรอล ปริมาณต่างๆ กัน	32
33	ค่าความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR หรือกลีเซอรอล ปริมาณต่างๆ กัน	32
34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงาน WG และ อุณหภูมิสำหรับกรณีการเติม ENR และกลีเซอรอล	34
35	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนเริ่มต้นของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR เปรียบเทียบกับกรณีการเติมกลีเซอรอล	35
36	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงาน WG ที่มีการเติม สารปรับปรุง ปริมาณ และเวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน	35
37	ผลของการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล อัตราส่วนต่างๆ กันที่มีต่อค่ามอดุลัสความต้าน ทานแรงดึงของชิ้นงาน WG	37
38	ภาพสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงาน WG ที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทก สำหรับกรณีชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR 20 % โดยน้ำหนัก และกลีเซอรอล 10 % โดย น้ำหนั เปรียบเทียบกับกรณีการเติมยาง ENR 30 % โดยน้ำหนัก	38
39	ผลของการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล อัตราส่วนต่างๆ กันที่มีต่อค่าความต้านทานแรง ดึงสูงสุดของชิ้นงาน WG	39
40	การเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดสำหรับชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล อัตราส่วนต่างๆ กัน	40
41	ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ WG ที่มีการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล อัตราส่วนต่างๆ กัน	40

รูปที่		หน้า
42	ค่าความต้านทานแรงกระทำของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR และกลีเซอรัล อัตราส่วนต่างๆ กัน	41
43	ค่าอุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR และกลีเซอรัล อัตราส่วนต่างๆ กัน	42
44	ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR และกลีเซอรัล อัตราส่วนต่างๆ กัน	42



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

พลาสติกเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้งานในรูปแบบต่างๆ ที่หลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปใช้งานทางด้านบรรจุภัณฑ์ ภาชนะใส่ของต่างๆ ส่งผลทำให้ปริมาณขยะพลาสติกมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และพลาสติกที่นำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่ยังคงทำมาจากพลาสติกที่ผลิตมาจากสารปิโตรเลียม เช่น พอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีน และพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต เป็นต้น ซึ่งพลาสติกกลุ่มดังกล่าวย่อยสลายได้ยาก และเมื่อพิจารณาถึงความยั่งยืนในการนำพลาสติกมาใช้งานและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการนำมาใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตร เช่น แป้ง โปรตีนจากพืชและจากสัตว์ และน้ำมันจากพืช ถือว่าเป็นกลุ่มพลาสติกชีวภาพที่มีความน่าสนใจในการนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากเป็นกลุ่มพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย (biodegradable) [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โปรตีนกลูเตน (Gluten Protein) เป็นโปรตีนที่มีอยู่ในธัญพืชจำพวกข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต ข้าวไรท์ และข้าวบาร์เลย์ และเป็นกลุ่มโปรตีนที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก ราคาจึงค่อนข้างถูก มีความสามารถในการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว โดยปราศจากการปลดปล่อยสารพิษ และมีสมบัติที่มีความเหมาะสม [1-4] แต่อย่างไรก็ตาม กลูเตนยังคงมีจุดอ่อนที่คล้ายคลึงกับพลาสติกชีวภาพชนิดอื่นๆ คือ พิล์มที่ทำจากกลูเตนค่อนข้างเปราะ และขึ้นรูปได้ยาก [1,3] ดังนั้นการเติมสารพลาสติกไซเซอร์จึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นในการช่วยลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) เพื่อช่วยทำให้กลูเตนสามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมพลาสติกได้ และช่วยลดความเปราะของฟิล์ม จากการศึกษาทางวิจัย พบว่ากลีเซอรอล (Glycerol) ถูกนิยมนำมาใช้เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ในการปรับปรุงสมบัติพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบการเกษตรรวมถึงโปรตีนกลูเตนด้วย [2-5] สำหรับในงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะนำยางธรรมชาติมาช่วยในการปรับปรุงสมบัติของกลูเตนทดแทนการใช้กลีเซอรอล เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง และมีความทนแรงดึงได้ดี [6-7] และมีอยู่ปริมาณมากในประเทศไทย

โครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาปรับปรุงสมบัติทางกล และความสามารถในการขึ้นรูปของโปรตีนกลูเตนด้วยการใช้ยางธรรมชาติทดแทน ซึ่งจะทำการศึกษาโดยแบ่งงานออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติทดแทนที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของโปรตีนกลูเตนแทนการใช้กลีเซอรอล และส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของการใช้ยางธรรมชาติทดแทนร่วมกับกลีเซอรอลที่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติของกลูเตน โดยการประเมินจากสมบัติทางกล ทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อกลุ่มอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์พลาสติกในประเทศไทยที่มีเครื่องมือขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับเทอร์โมพลาสติกในการนำความรู้ไปพัฒนาต่อยอด เพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล ความสามารถในการขึ้นรูป และลดต้นทุนการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากโพรตีนกลูเตน
- 1.2.2 เพื่อหาอัตราส่วนผสมระหว่างกลูเตนและยางธรรมชาติที่ดัดแปรที่เหมาะสมที่จะสามารถนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์
- 1.2.3 เพื่อเสริมสร้างศักยภาพ และความยั่งยืนให้กับอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพปลายน้ำ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 วัตถุประสงค์หลักที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย โพรตีนกลูเตน นํ้ายางธรรมชาติ และกลีเซอรอล
- 1.3.2 เครื่องมือที่ใช้การผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน คือ เครื่องผสม และเครื่องอัดความดันสูง
- 1.3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณยางธรรมชาติที่ดัดแปร และอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติที่ดัดแปร และกลีเซอรอล
- 1.3.4 สมบัติที่ทำการทดสอบ มีดังนี้
 - สมบัติทางกล ตามมาตรฐาน ASTM
 - สมบัติทางกายภาพ
 - สมบัติทางความร้อน
 - สัณฐานวิทยา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี – การปรับปรุงสมบัติพลาสติกชีวภาพที่ได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรด้วยยางธรรมชาติส่งเสริมให้นักวิจัยไทยมีการพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับพลาสติกชีวภาพเพิ่มมากขึ้น
- 1.4.2 ด้านสิ่งแวดล้อม – การปรับปรุงสมบัติพลาสติกชีวภาพโดยการใช้วัสดุจากธรรมชาติที่มีในประเทศส่งเสริมให้เกิดการใช้พลาสติกชีวภาพเป็นบรรจุภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์เพิ่มมากขึ้น จึงมีส่วนช่วยลดปริมาณขยะ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
- 1.4.3 ด้านวิชาการ – ภายหลังจากเสร็จสิ้นโครงการวิจัย จะนำผลงานวิจัยไปเผยแพร่ในรูปแบบของการตีพิมพ์บทความในวารสารวิชาการ และ/หรือการประชุมวิชาการ
- 1.4.4 หน่วยงานที่สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ – กลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพปลายน้ำ และ/หรือกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกชีวภาพ

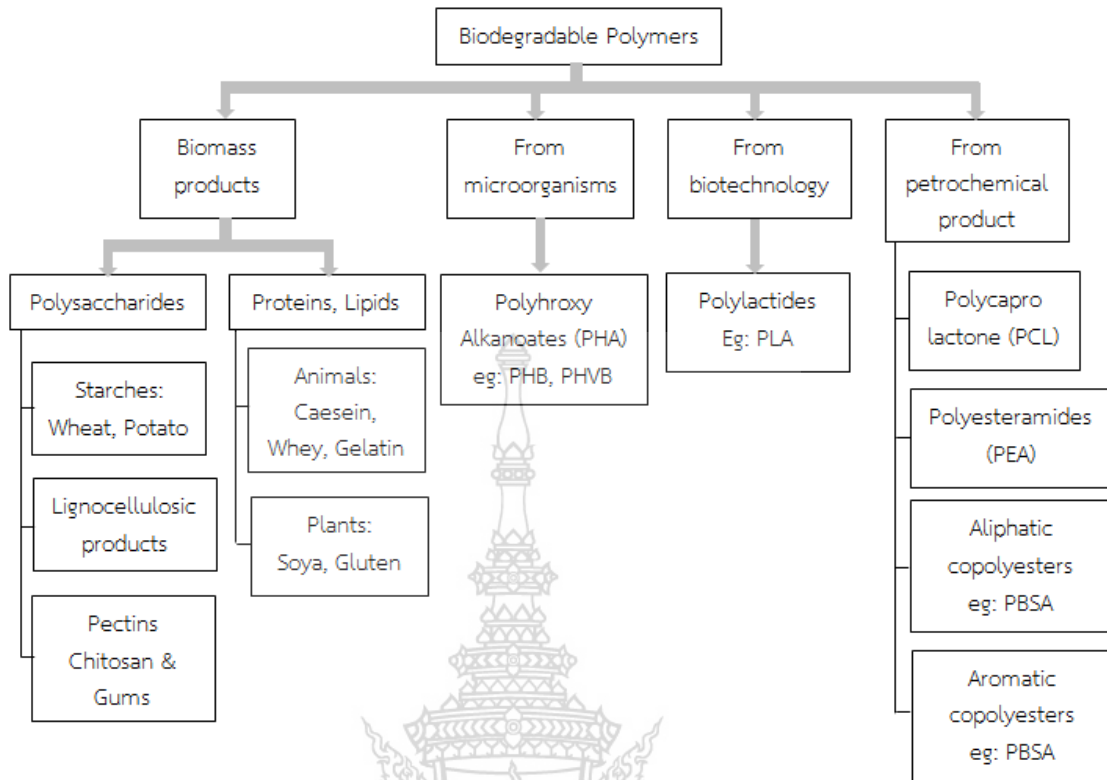
พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) เป็นพลาสติกที่สังเคราะห์หรือผลิตได้จากวัสดุธรรมชาติ เช่น น้ำตาล แป้งมันฝรั่ง เซลลูโลสจากต้นไม้ ข้าวโพด หรืออ้อย เป็นต้น และ/หรือสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Biodegradable) [8]

ประเภทของพลาสติกชีวภาพ [8] สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลักๆ

1. พลาสติกชีวภาพที่ผลิตหรือสังเคราะห์จากวัสดุธรรมชาติบางส่วนหรือทั้งหมดและไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ เช่น โพลีเอทิลีน (PE) โพลีพรอพิลีน (PP) หรือ โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)
2. พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติและสามารถย่อยสลายได้ เช่น โพลีแลกติกแอซิด (PLA) โพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอท (PHA) และโพลิบิวทีลีนซัคซิเนท (PBS) เป็นต้น
3. พลาสติกชีวภาพที่ผลิตมาจากฟอสซิลหรือปิโตรเคมีและสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ เช่น โพลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทเรฟทาเลต (PBAT)

สำหรับกลุ่มพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Biodegradable polymer) [9-11] ดังแสดงในรูปที่ 1 สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มหลักๆ ดังนี้

1. โพลีเมอร์ที่ได้จากวัสดุทางการเกษตร (Agro-polymer) เช่น แป้ง เซลลูโลสที่ได้จากวัสดุทางการเกษตร โปรตีนจากสัตว์และจากพืช และไขมัน เป็นต้น
2. โพลีเมอร์ที่ผลิตโดยการหมักสารชีวมวลด้วยจุลินทรีย์ เช่น PHA เป็นต้น
3. โพลีเมอร์ที่ผลิตโดยการสังเคราะห์โมโนเมอร์จากสารชีวมวลด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น PLA เป็นต้น
4. โพลีเมอร์กลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่สังเคราะห์โดยกระบวนการปิโตรเคมี เช่น พอลิคาโพรแลคโตน (PCL) พอลิเอสเทอร์อะไมด์ (PEA) โคพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ (Aliphatic copolyester) และโคพอลิเอสเทอร์แบบอะโรมาติก (Aromatic copolyester) เป็นต้น



รูปที่ 1 การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ [10]

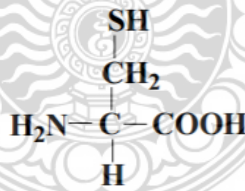
พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุทางเกษตรเป็นกลุ่มพลาสติกชีวภาพที่สามารถนำมาผลิตเป็นฟิล์มที่สามารถย่อยสลายได้ และมีความเหมาะสมในการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร แต่ต้องมีการปรับปรุงสมบัติทางกลให้ดีขึ้น โปรตีนเป็นแหล่งพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ถูกผลิตออกมาในปริมาณมาก เช่น กลูเตนจากข้าวสาลี (Wheat gluten) โปรตีนจากถั่วเหลืองและถั่วชนิดอื่นๆ โปรตีนจากไข่ขาว และโปรตีนที่อยู่ในรูปของเคราติน (Keratin proteins) จากสัตว์ [11]

กลูเตนจากข้าวสาลี (Wheat gluten, WG)

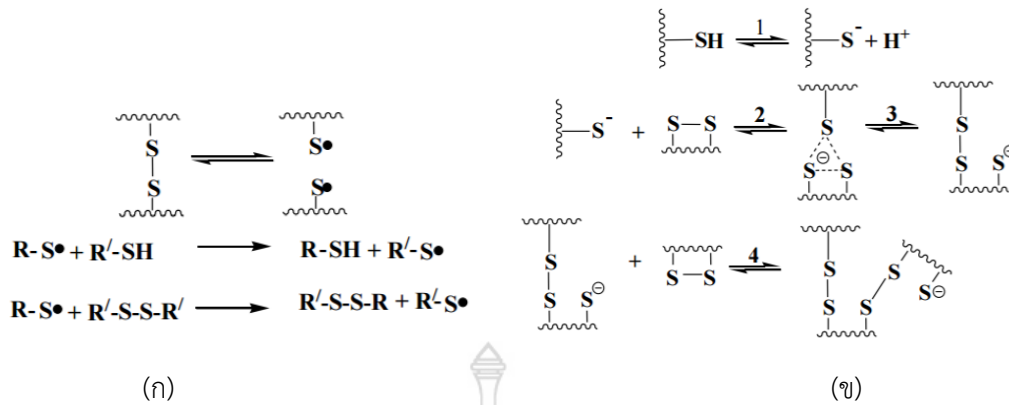
กลูเตนเป็นโปรตีนที่สามารถผลิตได้จากธัญพืชชนิดต่างๆ เช่น ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต ข้าวไรท์ ข้าวบาร์เลย์ และข้าวโพด แต่โดยทั่วไปแล้วกลูเตนจะผลิตมาจากข้าวสาลี WG เป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ที่ได้จากอุตสาหกรรมอาหาร [2] WG เกิดจากการรวมตัวกันของโปรตีนกลูเตนิน (Glutenin) และไกลอะดีน (Gliadin) โดยการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ (Disulfide bond) ระหว่างกัน [12] กลูเตนมีสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic) เนื่องจากกลูเตนินมีสมบัติยืดหยุ่น (Elastic properties) ในขณะที่ไกลอะดีนแสดงสมบัติไหลหนืด (Viscous properties) [14] ดังนั้น WG จึงเป็นวัตถุดิบธรรมชาติที่มีความน่าสนใจในการนำมาพัฒนาผลิตเป็นฟิล์มที่ย่อยสลายได้ เพราะ WG มีสมบัติการรับแรงที่ดี และสามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์โดยปราศจากการปลดปล่อยสารพิษ [2] WG สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มและพลาสติกด้วย

วิธีการขึ้นรูปแบบเทอร์โมพลาสติกโดยการผสมด้วยวิธีทางกล และให้ความร้อนขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ แต่การที่ WG จะขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปของพลาสติกแบบดั้งเดิมได้นั้นจำเป็นต้องมีการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ เพราะ WG ที่ไม่มีการเติมสารพลาสติกไซเซอร์มีผลทำให้ชิ้นงานเปราะ และขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ยาก สารพลาสติกไซเซอร์มีหน้าที่ช่วยลดแรงดึงดูระหว่างโมเลกุล และนำไปสู่การลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ WG ซึ่งส่งผลทำให้สามารถใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ต่ำลงได้ กลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกลุ่มที่ชอบน้ำซึ่งถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการขึ้นรูปของโปรตีนแบบเทอร์โมพลาสติก [2] สำหรับสมบัติการเป็นตัวกันความชื้นของฟิล์มโปรตีนสามารถถูกปรับปรุงได้อย่างมากด้วยการเติมสารที่ไม่ชอบน้ำ เช่น ไขมัน กรดไขมันที่อิ่มตัวที่เป็นสายโซ่ยาว โมโนกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ หรือโดยการผ่านเทคโนโลยีการเคลือบผิว การมีอยู่ของน้ำมันหรือไขมันในฟิล์มโปรตีนมีส่วนช่วยลดแรงกระทำระหว่างสายโซ่โปรตีนจึงมีส่วนช่วยทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น และมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของฟิล์มลดลง [4,12-13]

กลูเตนเป็นโปรตีนที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนหลากหลายชนิด แต่กรดอะมิโนที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างและสมบัติของกลูเตน คือ ซีสทีน (Cystine) ถึงแม้ซีสทีนจะมีอยู่เพียง 2 %โมล ทั้งนี้เพราะซีสทีนมีหมู่ไทออล (Thiol group, SH) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งสามารถเกิดพันธะการเชื่อมโยง (crosslink) ระหว่างสายโซ่โปรตีนได้ ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ 2 กลไก คือ กลไกแรดิคัล (Radical mechanism) และกลไกนิวคลีโอฟิลิก (Nucleophilic mechanism) ซึ่งทั้ง 2 กลไกนี้สามารถเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปกลูเตนด้วยวิธีเดียวกับเทอร์โมพลาสติกซึ่งได้รับทั้งความร้อนและแรงเฉือน [12,14] การเชื่อมโยงของสายโซ่โปรตีนมีผลต่อสมบัติของกลูเตน สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการเชื่อมโยง เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป ชนิดของ พลาสติกไซเซอร์ และสารเติมแต่ง เป็นต้น [12]



รูปที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของซีสทีน [12]



รูปที่ 3 กลไกการเกิดพันธะการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โปรตีน [12]

(ก) กลไกแรดิคัล

(ข) กลไกนิวคลีโอฟิลิก

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดพันธะการเชื่อมโยง [12]

1. อิทธิพลของพลาสติกไซเซอร์: กรณีการใช้กรดแลคติก (Lactic acid) หรือกรดออกทานอิก (Octanoic acid) เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่มีผลทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงของสายโซ่กลูเตนเกิดลดลง ทั้งนี้เพราะการเติมกรดแลคติก หรือกรดออกทานอิกลงในกลูเตนมีผลทำให้กลูเตนอยู่ในสถานะที่เป็นกรด ซัลเฟอร์แอนไอออนที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกลไกนิวคลีโอฟิลิก ในรูปที่ 3 (ข) จึงถูกยับยั้ง
2. อิทธิพลของอุณหภูมิ: ความร้อนในระหว่างกระบวนการผสม หรือขึ้นรูปกลูเตนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณการเชื่อมโยงของสายโซ่กลูเตน เนื่องจากความร้อนที่ได้รับจะไปเหนี่ยวนำทำให้สายโซ่โปรตีนที่ขดเป็นเกลียวเกิดการคลายเกลียว มีผลทำให้การเชื่อมขวางของสายโซ่กลูเตนผ่านพันธะไดซัลไฟด์เกิดได้ง่ายขึ้น ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิการขึ้นรูปมีแนวโน้มทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงของสายโซ่มีมากขึ้นซึ่งส่งผลทำให้สมบัติการรับแรงของกลูเตนมีแนวโน้มสูงขึ้น ค่าการซึมผ่านของไอน้ำลดลง และการบวมตัวลดลง
3. อิทธิพลของสารเติมแต่ง: งานวิจัยจำนวนหนึ่งได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของเติมเส้นใยธรรมชาติลงในกลูเตน ซึ่งพบว่า เส้นใยธรรมชาติสามารถเข้ากันได้กับกลูเตนได้ดี ถ้าเส้นใยธรรมชาติมีปริมาณลิกนินในปริมาณมาก ทั้งนี้เพราะลิกนินมีโครงสร้างทางเคมีเป็นโครงสร้างร่างแหของพอลิฟีนอลิก (Polyphenolic) ซึ่งสามารถเกิดแรงกระทำระหว่างกัน (interaction) กับกลูเตน ดังนั้นลิกนินจึงทำหน้าที่เป็นสารเสริมความเข้ากันได้ (compatibilizer) ระหว่างกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติ นอกจากนี้ลิกนินในเส้นใยธรรมชาติยังทำหน้าที่เป็นสารดักจับอนุมูล (Radical scavenger) ทั้งอนุมูลอิสระ (Free radical) และแอนไอออน (Anion) ซึ่งส่งผลทำให้การเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่กลูเตนเกิดลดลง เนื่องจากลิกนินจะไปดักจับอนุมูลอิสระ และแอนไอออนของกลูเตนในระหว่างการให้ความร้อนในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป

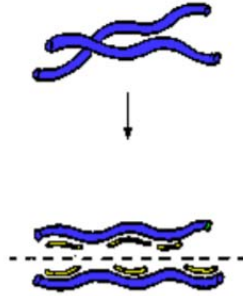
2.2 พลาสติไซเซอร์ [15]

พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดเฉื่อย (inert organic compounds) ที่มีจุดเดือดสูง และความดันไอต่ำ เช่น ผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม ไชมันส์ตว์ สารสกัดจากพืช และสารที่สังเคราะห์ขึ้น เป็นต้น พลาสติไซเซอร์ถูกเติมลงในพลาสติก หรือยาง เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูป เนื่องจากพลาสติไซเซอร์มีผลทำให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอม เหลวลดลง ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง และลดค่ามอดูลัสอีลาสติกของพอลิเมอร์ พลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ ความสามารถในการเข้ากันได้ของพลาสติไซเซอร์และพอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับ สภาพขั้ว ความสามารถในการละลาย รูปร่างของโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของพลาสติไซเซอร์ และความคล้ายคลึงกันของโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์และ พลาสติไซเซอร์ ส่วนอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการคงทนของพลาสติไซเซอร์ คือ ความต้านทานการแพร่ผ่านของพลาสติไซเซอร์มาที่ผิวชิ้นงาน ดังนั้นพลาสติไซเซอร์ที่ดีควรจะต้องมีจุดเดือดสูงและความดันไอต่ำเพื่อป้องกันการสูญเสียพลาสติไซเซอร์ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป อัตราการแพร่ผ่านของพลาสติไซเซอร์มาที่ผิวชิ้นงานต่ำมีส่วนช่วยในการรักษาสมบัติที่เกิดขึ้นจากการเติมพลาสติไซเซอร์ และหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนของพลาสติไซเซอร์ไปยังสิ่งของที่ชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ไปสัมผัสเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ความคงทนของพลาสติไซเซอร์ ขึ้นอยู่กับ ขนาดโมเลกุลของพลาสติไซเซอร์ โมเลกุลของพลาสติไซเซอร์ยังมีขนาดใหญ่ยิ่งทำให้พลาสติไซเซอร์มีความคงทนอยู่ในชิ้นงานสูง พลาสติไซเซอร์มีอิทธิพลต่อกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ คือ การเปลี่ยนแปลงความหนืด อัตราการกระจายตัวของสารเพิ่มเนื้อลักษณะของการไหล ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการขึ้นรูป และการเกิดความร้อน พลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องมีความว่องไวต่อรังสียูวีต่ำ มีเสถียรภาพในช่วงอุณหภูมิกว้าง และมีราคาไม่แพง ประสิทธิภาพของพลาสติไซเซอร์สามารถถูกอธิบายได้จากปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่เติมเพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ต้องการ

กลไกการทำงานของพลาสติไซเซอร์ [15]

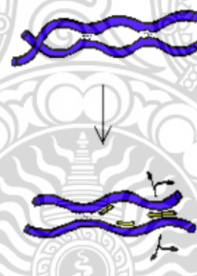
กลไกการทำงานของพลาสติไซเซอร์ สามารถถูกอธิบายด้วยทฤษฎีที่หลากหลาย ดังนี้

1. ทฤษฎีการทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricity theory) ถูกเสนอโดย Kilpatrick และคณะ ซึ่งได้อธิบายว่าพลาสติไซเซอร์ทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์มีผลทำให้ความแข็งแกร่ง (rigidity) ของพอลิเมอร์ลดลง ขณะที่ให้ความร้อนโมเลกุลของพลาสติไซเซอร์จะแทรกตัวอยู่ที่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งมีผลทำให้แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่ลดลง พอลิเมอร์จึงมีความอ่อนตัวและยืดหยุ่นมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การตอบสนองของพอลิเมอร์ต่อพลาสติกไซเซออร์ตามทฤษฎีการทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น [16]

- ทฤษฎีเจล (Gel theory) ถูกพัฒนาขึ้นโดย Aiken และคณะ ความคงรูปร่าง (Stiffness) ของพอลิเมอร์เป็นผลมาจากการเกิดเจลยึดติดกันบนสายโซ่ของพอลิเมอร์ซึ่งส่งผลทำให้พอลิเมอร์ยอมที่จะเคลื่อนที่ได้เพียงเล็กน้อย การเกิดเจลบนสายโซ่พอลิเมอร์อาจเป็นผลมาจากแรงแวนเดอร์วาล (Van der Waals force) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) หรือโครงสร้างผลึก เมื่อตำแหน่งที่เกิดเจลสามารถเกิดแรงกระทำกับพลาสติกไซเซออร์มีผลทำให้เกิดการแยกออกจากกันของพอลิเมอร์ตรงตำแหน่งที่เกิดเจล จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 การเติมพลาสติกไซเซออร์จึงมีผลทำให้ความแข็งแกร่งของโครงสร้างเจลพอลิเมอร์ลดลง



รูปที่ 5 การลดการเกิดเจลของพอลิเมอร์โดยการเติมพลาสติกไซเซออร์ [16]

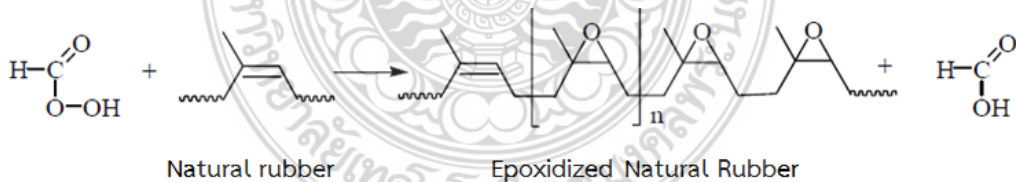
- ทฤษฎีช่องว่างอิสระ (Free volume theory) การเติมพลาสติกไซเซออร์ลงในพอลิเมอร์มีส่วนช่วยทำให้ช่องว่างอิสระของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์มีค่าลดลง พลาสติกไซเซออร์เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ส่งผลทำให้ช่องว่างอิสระเพิ่มขึ้น จึงมีส่วนช่วยทำให้โมเลกุลพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น
- ทฤษฎีกกลไกทางกล (Mechanistic theory) ทฤษฎีนี้ได้อธิบายไว้ว่าพลาสติกไซเซออร์ไม่สามารถอยู่กับพอลิเมอร์ได้อย่างถาวร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ ณ ปริมาณพลาสติกไซเซออร์น้อยๆ แรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกไซเซออร์มีมากกว่าแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์ และแรง

กระทำการระหว่าง พลาสติกไฮเซออร์ด้วยตัวเอง ส่วนกรณีปริมาณพลาสติกไฮเซออร์ปริมาณมาก แรงกระทำระหว่างพลาสติกไฮเซออร์มีค่าโดดเด่นที่สุด

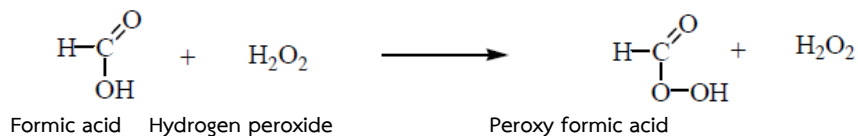
2.3 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์

การสังเคราะห์ยางธรรมชาติอีพอกไซด์

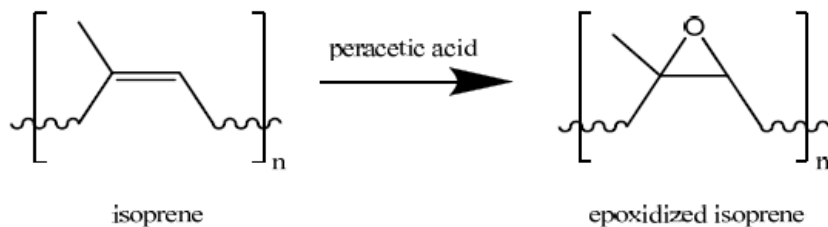
ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxydized natural rubber, ENR) ถูกผลิตจากการนำยางธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับกรดเปอร์ฟอร์มิก (Performic acid) ดังรูปที่ 6 กรดเปอร์ฟอร์มิกถูกเตรียมโดยการทำปฏิกิริยาของกรดฟอร์มิกกับไฮโดรเจนเปอร์ไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 7 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่าปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxydation reaction) ซึ่งในการทำปฏิกิริยาต้องเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ควบคุมความเข้มข้นของกรด และอุณหภูมิอย่างระมัดระวังเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนของหมู่อีพอกไซด์ (Ring opening reaction) เพราะมีผลต่อสมบัติของยาง ENR หมู่อีพอกไซด์กระจายตัวอยู่บนสายโซ่ของยางธรรมชาติแบบสุ่ม [17-18] นอกจากการใช้กรดเปอร์ฟอร์มิกในการเตรียมยาง ENR ยังสามารถใช้กรดเปอร์แอซิด (Peracid) และกรดเปอร์ออกซี (Peroxy acid) รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันโดยการใช้กรดเปอร์แอซิดิก (peracetic acid) เข้าทำปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาติ ในการเตรียมยาง ENR ทางการค้าสามารถปรับเปลี่ยนดีกรีของการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันได้ เช่น หน่วยของไอโซพรีนบนสายโซ่ของยางธรรมชาติถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน 25 50 และ 75 %mol จะถูกเรียกว่า ENR-25, ENR-50 และ ENR-75 ตามลำดับ รูปที่ 9 แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไปของยาง ENR-50 การดัดแปรให้ยางธรรมชาติมีหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้างช่วยทำให้ยางธรรมชาติที่ผ่านการดัดแปร มีสมบัติความต้านทานต่อน้ำมันและความต้านทานการซึมผ่านของแก๊สดีขึ้น นอกจากนี้ยางธรรมชาติที่ผ่านการดัดแปรยังคงสมบัติการเกิดผลึกในขณะที่ได้รับแรงดึงเช่นเดียวกับกรณียางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปร [19]



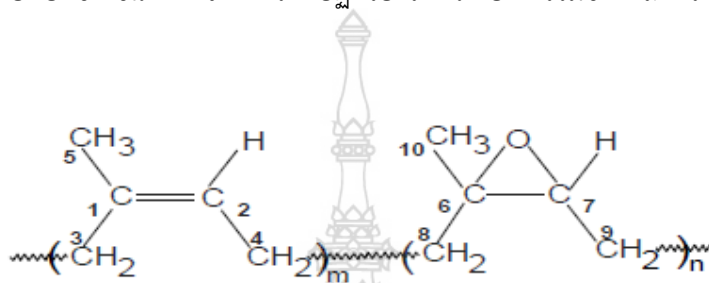
รูปที่ 6 ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันที่ดัดแปรยางธรรมชาติให้กลายเป็นยาง ENR ด้วยกรดเปอร์ฟอร์มิก [17]



รูปที่ 7 การเตรียมกรดเปอร์ฟอร์มิกจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ไซด์ [17]



รูปที่ 8 ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและกรดเปอร์แอซิดิก [19]



รูปที่ 9 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยาง ENR-50 [19]

สมบัติของยาง ENR

การตัดแปรงยางธรรมชาติให้กลายเป็นยาง ENR มีผลทำให้เกิดสมบัติที่โดดเด่น ดังนี้ คือ มีสมบัติความทนต่อน้ำมันเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่ำ และความทนต่อสารเคมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ แต่ยังคงรักษาสมบัติการเกิดผลึกในขณะการได้รับแรงดึงเช่นเดียวกับกรีดยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการตัดแปรง สมบัติที่ได้รับการปรับปรุงเหล่านี้ขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่อยู่ในสายโซ่หลักของยางธรรมชาติที่ผ่านการตัดแปรง ยิ่งปริมาณหมู่อีพอกไซด์เพิ่มมากขึ้นยิ่งมีผลทำให้สมบัติข้างต้นได้รับการปรับปรุงมากยิ่งขึ้น สำหรับยาง ENR-50 สามารถทนต่อน้ำมัน และมีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซได้ใกล้เคียงกับยางสังเคราะห์บางชนิด เช่น ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber) และยางบิวไทล์ (Butyl rubber) [16, 18] นอกจากนี้ดีกรีอีพอกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นยังมีผลทำให้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้นประมาณ 1 องศาเซลเซียสต่อ 1 mol% จากตารางที่ 1 พบว่า สมบัติที่ด้อยลงของยาง ENR คือ สมบัติการกระดอน (Resilience) ของยาง ENR-50 ลดลงอย่างมาก และสมบัติการสะสมความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับยาง ENR-25 แต่สมบัติความทนต่อแรงดึงยังคงมีค่าสูงไม่เปลี่ยนแปลง [17] ยาง ENR ถูกนำมาใช้งานได้อย่างกว้างขวางทั้งในส่วนของชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ต้องสัมผัสกับอาหาร รองเท้า พื้นยาง ท่อยางด้านในจักรยาน และกาว [18]

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของยาง ENR เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ [18]

Properties	Black filled		
	NR	ENR-25	ENR-50
Tensile strength (MPa)	28	27	25
Elongation at break (%)	560	530	520
Modulus at 300 % (MPa)	13	13	12
Hardness, IRHD	65	66	68
Resilience at 23 °C (%)	61	44	26
Heat build-up (°C)	18	20	27

2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Song, Y. และคณะ (2008) [4] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมน้ำมันละหุ่งลงใน WG ที่เติมกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างกลีเซอรอลและน้ำมันละหุ่ง จากงานวิจัยชี้ว่า เมื่อสัดส่วนของน้ำมันละหุ่งเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ค่ามอดุลัสและความต้านทานแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น แต่ทำให้การดูดซับความชื้นลดลง และจากการงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สารกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำตัวอื่น ได้แก่ น้ำมันซิลิโคน และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxane) เติมนลงใน WG ที่เติมกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ พบว่า การเติมสารกลุ่มไม่ชอบน้ำมีผลในการปรับปรุงสมบัติทางกล และการดูดซับความชื้นเช่นเดียวกับกรณีการเติมน้ำมันละหุ่ง

Nampitch, T. และ Magaraphan, R. (2010) [20] ได้ทำการศึกษาผลของการนำยาง ENR มาฉายรังสีก่อนการนำไปผสมกับ PLA ในอัตราส่วน PLA: ยางENR คือ 90:10 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะรังสีทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (crosslink density) ในเฟสของยาง ENR เพิ่มมากขึ้น แต่มีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนลดลง เนื่องจากรังสีมีผลทำให้ยาง ENR เกิดการขาดของสายโซ่จึงเกิดการสลายตัวได้ง่าย

Zhang, C. และคณะ (2011) [21] ได้ทำการปรับปรุงความเหนียวของ PLA โดยการเติมยางธรรมชาติที่ผ่านการให้ความร้อนและแรงเฉือนด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิด (internal mixer) โดยได้มีการปรับเปลี่ยนเวลาในการให้ความร้อนและแรงเฉือน 0 5 และ 10 นาที และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณของยางธรรมชาติที่ 0 1 3 5 และ 10 %โดยน้ำหนัก จากงานวิจัย พบว่า กรณี PLA ที่มีการเติมยางธรรมชาติที่ผ่านการให้ความร้อนและแรงเฉือน 10 นาที ปริมาณ 3 %โดยน้ำหนักสามารถปรับปรุงการยึดตัว ณ จุดขาดและความเหนียวได้สูงที่สุด และมีการลดลงของค่าความต้านทานแรงดึงเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะการให้ความร้อนและแรงเฉือนกับยางมีผลทำให้ยางมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง และเกิดหมู่คาร์บอนิล (C=O) และหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ขึ้นซึ่งสามารถเกิดแรงกระทำกับหมู่เอสเทอร์ใน PLA จึงเสริมการยึดเกาะระหว่างเฟส

Bitinis, N. และคณะ (2012) [22] ได้ทำการศึกษาผลของการปรับความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ซึ่งมีสมบัติการเสีรูปร่างแบบเปราะด้วยการเติมยางธรรมชาติ จากการศึกษาพบว่า การเติมยางธรรมชาติมีส่วนช่วยให้การแตกหักของ PLA เปลี่ยนแปลงจากการแตกหักแบบเปราะไปเป็นการแตกหักแบบเหนียว และการเติมนาโนเคลย์ 1 %โดยน้ำหนัก ลงใน PLA ที่มีการเติมยางธรรมชาติช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการยึดตัวให้มากขึ้น

Gómez-Martínez, D. และคณะ (2013) [1] ได้ทำการพัฒนาพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจาก WG เพื่อใช้ในงานทางการเกษตร โดยการศึกษาผลของการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันเป็นสารพลาสติกไซเซอร์แทนการใช้กลีเซอรอล และการเติมสารปรับปรุงต่างๆ ชนิดกัน เพื่อปรับปรุงให้ WG สามารถเป็นแหล่งกักเก็บน้ำ และทำหน้าที่ปลดปล่อยสารอาหารให้กับพืช (KCl) จากงานวิจัยพบว่า น้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มสูงขึ้นของ PEG มีผลทำให้ WG มีความคงรูป มีความเป็นอิลาสติก และดูดซับน้ำได้เพิ่มมากขึ้น และการใช้ PEG แทนกลีเซอรอลมีผลทำให้ KCl มีการปลดปล่อยออกมาได้ช้าลง ส่วนผลของการเติมสารปรับปรุงแตกต่างกัน พบว่า การเติมสารปรับปรุงมีผลทำให้การปลดปล่อย KCl เพิ่มมากขึ้น และลดปริมาณการดูดซับน้ำลง กรดซิตริก (Citric acid) เป็นสารปรับปรุงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

Zarate-Ramírez, L.S. และคณะ (2014) [2] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมสารในกลุ่มอัลดีไฮด์ที่มีผลต่อสมบัติเทอร์โมแมคคานิคัล (Thermomechanical properties) ของ WG ซึ่งทำการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องอัดความดันสูง จากการศึกษาพบว่า ไกลออกซอล (Glyoxal) เป็นสารอัลดีไฮด์ที่มีผลทำให้สมบัติทางกลและทางความร้อนที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับฟอร์มอลดีไฮด์ (Formaldehyde) และกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde)

Wahit, M.U. และคณะ (2105) [23] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับความเหนียวของ PLA โดยการเติมยาง ENR-50 ในปริมาณที่แตกต่างกัน จากงานวิจัยพบว่า การปรับความเหนียวของ PLA สามารถเกิดขึ้นเมื่อเติมยาง ENR-50 ปริมาณตั้งแต่ 20 %โดยน้ำหนักขึ้นไป ในขณะที่การเติมยาง ENR-50 มีผลทำให้ค่าความมอดูลัสและความทนต่อแรงดึง และแรงดัดลดลงทันทีที่มีการเติมยาง ENR-50

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ แบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน งานวิจัยในส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติดัดแปรที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติของโปรตีนกลูเตนแทนการใช้กลีเซอรอล หลังจากนั้นเลือกสูตรที่เหมาะสมมาทำการศึกษาผลของการใช้ยางธรรมชาติดัดแปรร่วมกับกลีเซอรอลที่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติของกลูเตน

3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 กลูเตนจากข้าวสาลี ของบริษัท เจ.เอ็น.พี.ไอ. อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อน ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผงกลูเตนจากข้าวสาลี

3.1.2 ยางธรรมชาติอพอกไซด์ ที่ผลิตโดยบริษัท เมืองใหม่กัททรี จำกัด (มหาชน) เกรด ENR25 ซึ่งเป็นเกรดยางธรรมชาติถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาอพอกซิเดชัน 25 %mol มีลักษณะดังรูปที่ 11

3.1.3 กลีเซอรอล จากบริษัท Ajax Finechem Pty จำกัด ทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์

3.1.4 ซิงก์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) จากบริษัท เวสเซล เคมีเคิล จำกัด ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) สำหรับยาง ENR

3.1.5 กรดสเตียริก (Stearic acid) จากบริษัท เวสเซล เคมีเคิล จำกัด ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาสำหรับยาง ENR

- 3.1.6 กำมะถัน (Sulphur) จากบริษัท เวสเซล เคมิคัล จำกัด ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์สำหรับยาง ENR
- 3.1.7 เมอร์แคปโทเบนโซไทอะโซล (2- mercaptobenzothiazole; MBT) จากบริษัท เวสเซล เคมิคัล จำกัด ทำหน้าที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) สำหรับยาง ENR



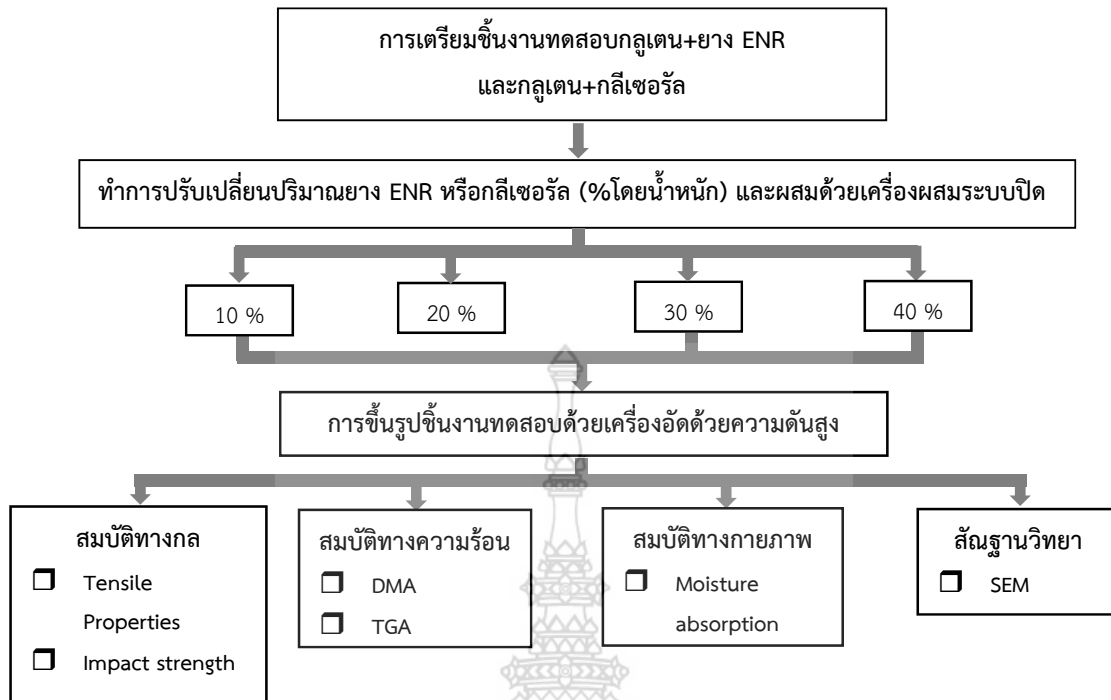
รูปที่ 11 ยาง ENR เกรด ENR25 จากบริษัท เมืองใหม่กัตทรี จำกัด (มหาชน)

3.2 แผนการดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินการวิจัย แบ่งงานออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.2.1 การศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติที่ดัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติโปรตีนกลูเตนแทนการใช้กลีเซอรอล

ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณยาง ENR ที่ใช้ในการผสมกับโปรตีนกลูเตน ปริมาณตั้งแต่ 10 -40 % โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการผสมของผสมด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิด (internal mixer) และทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดความดัน (Compression machine) ชิ้นงานที่ได้จะถูกนำมาทดสอบสมบัติทางกล ทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสัมมนาวิทยา เปรียบเทียบผลกับกรณีกลูเตนที่เติมกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 แผนภาพการดำเนินงานวิจัยการศึกษาหาปริมาณยาง ENR ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติโพรตีนกลูเตนแทนการใช้กลีเซอรัล

3.2.2 การศึกษาผลของการใช้ยางธรรมชาติที่ดัดแปรผสมกับกลีเซอรัลที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติของโพรตีนกลูเตน

พิจารณาเลือกสูตรที่เหมาะสมจากหัวข้อที่ 3.2.1 มาทำการศึกษาผลของการนำยางธรรมชาติที่ดัดแปรมาผสมกับกลีเซอรัลในอัตราส่วนต่างๆ กัน และนำมาผสมรวมกับกลูเตน ด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิด จากนั้นนำมาขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ และทำการทดสอบสมบัติต่างๆ โดยมีรายละเอียดเช่นเดียวกับหัวข้อ

3.2.1

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 วิธีการศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติที่ดัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติโพรตีนกลูเตนแทนการใช้กลีเซอรัล

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในส่วนนี้ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- ขั้นตอนการผสม WG กับยาง ENR หรือกลีเซอรัล
- ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ
- ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

ขั้นตอนการผสม WG กับยาง ENR หรือกลีเซอรอล

สำหรับการผสม WG กับยาง ENR หรือกลีเซอรอลดำเนินการโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด ปริมาณของผสมระหว่าง WG และยาง ENR หรือกลีเซอรอล แต่ละครั้งของการผสมมีน้ำหนักรวมกัน 60 กรัม โดยในงานวิจัยส่วนนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณ ยาง ENR หรือกลีเซอรอล ตั้งแต่ 10 – 40 %โดยน้ำหนัก เพื่อทำการเปรียบเทียบผลของการเติมยาง ENR กับกรณีการเติมกลีเซอรอลที่มีผลต่อสมบัติของ WG และหาปริมาณยาง ENR ที่เหมาะสม สำหรับสูตร WG ที่ไม่มีการเติมยาง ENR หรือกลีเซอรอลไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ จึงไม่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ สำหรับกรณียาง ENR ต้องมีการเติมสารเคมีเพื่อให้ยางเกิดปฏิกิริยาควตาคาโนเซชัน โดยมีรายละเอียดของสูตรยางคอมปาวด์ดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สูตรยางคอมปาวด์ของยาง ENR ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ชื่อสารเคมี	ปริมาณ (phr)
ยาง ENR	5
ZnO	2
Stearic acid	2.5
Sulphur	0.6

1. กรณีการผสม WG กับยาง ENR มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- เริ่มต้นจากการชั่งน้ำหนัก WG ยาง ENR และสารเคมี ดังรายละเอียดในตารางที่ 2 ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณยาง ENR ตั้งแต่ 10 – 40 %โดยน้ำหนัก
- ทำการผสมยาง ENR กับสารเคมี ด้วยเครื่องผสมระบบปิด รุ่น MX75-TQ ของบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด ดังรูปที่ 13 เริ่มต้นจากนำยาง ENR ไปปั่นผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วของโรเตอร์ 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นทำการเติมสารกระตุ้น ZnO และกรดสเตียริก และทำการผสมเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงทำการเติมกำมะถัน และทำการผสมเพื่อให้ยางและสารเคมีผสมเข้ากันดี เป็นเวลาอีก 5 นาที ขั้นตอนสุดท้ายของการผสม ทำการเติม WG ลงในยางคอมปาวด์ และทำการปั่นผสมเป็นเวลาอีก 20 นาที จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบต่อไป

2. กรณีการผสม WG กับกลีเซอรอล มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- เริ่มต้นจากการชั่งน้ำหนัก WG และกลีเซอรอล ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณกลีเซอรอล ตั้งแต่ 10 – 40 %โดยน้ำหนัก
- ทำการผสม WG และกลีเซอรอล โดยการนำ WG และกลีเซอรอลมาผสมกันด้วยเครื่องผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วของโรเตอร์ 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้ดีก่อนการนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบต่อไป



รูปที่ 13 เครื่องผสมระบบปิด รุ่น MX75-TQ ของบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด

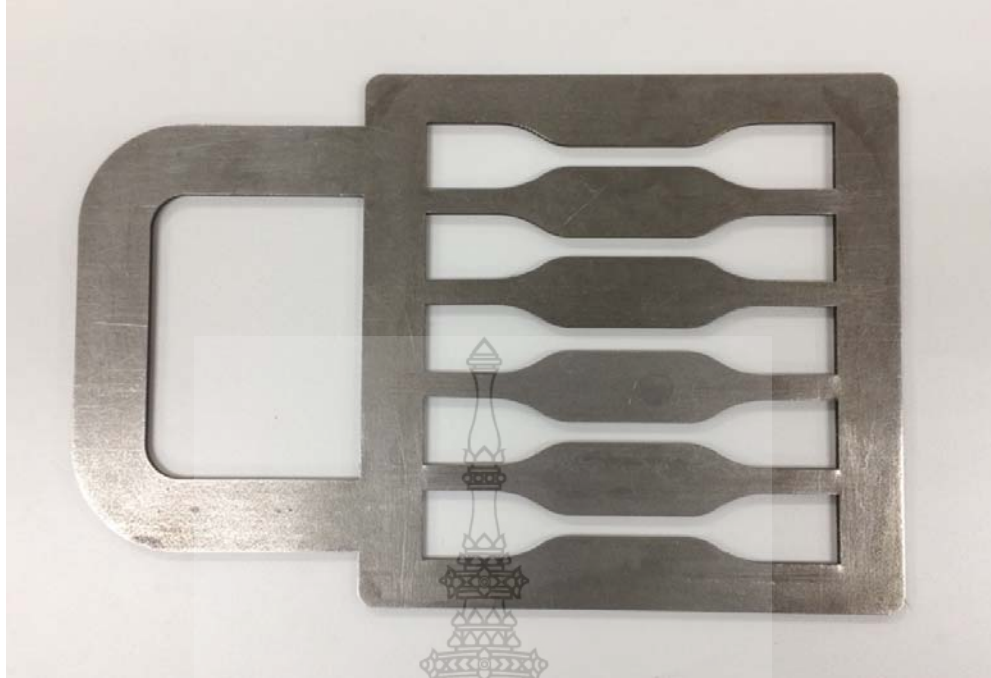
ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

1. นำของผสม WG และยาง ENR และของผสม WG และกลีเซอรอล ที่ได้จากหัวข้อที่แล้วมาทำการอบไล่ความชื้นในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
2. จากนั้นนำของผสมแต่ละสูตรมาทำการอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง และชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก ด้วยเครื่องอัดด้วยความดัน ยี่ห้อ Comotech รุ่น QC-601T ของบริษัท Comotech ประเทศไต้หวัน ดังรูปที่ 14 และลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง แบบ Type IV อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 638 และชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 256 เป็นดังแสดงในรูปที่ 15 และ 16 ตามลำดับ สำหรับสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป มีรายละเอียดเป็นดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึง และแรงกระแทก คือ 150 องศาเซลเซียส
- ขั้นตอนการอุ่นให้ความร้อน (preheat) ใส่สารคอมปาวด์ในแม่พิมพ์ทำการอุ่นให้ความร้อนแก่ของผสม จนกระทั่งอุณหภูมิได้ตามที่ตั้งไว้ จากนั้นทำการอุ่นเม็ดคอมปาวด์ เป็นเวลา 10 นาที
- ขั้นตอนการอัดด้วยความดัน (compress) ทำการปิดแม่พิมพ์ ด้วยความดัน 2500 psi ดังแสดงในรูปที่ 17 เป็นเวลา 10 นาที
- ขั้นตอนการหล่อเย็น (cooling) ทำการหล่อเย็นชิ้นงานเป็นเวลา 10 นาที ด้วยน้ำหล่อเย็น หลังจากนั้นทำการแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 14 เครื่องอัดด้วยความดัน ยี่ห้อ Comotech รุ่น QC-601T



รูปที่ 15 แม่พิมพ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง



รูปที่ 16 แม่พิมพ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก



รูปที่ 17 ขั้นตอนการอัดให้ความดัน

ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

➤ สมบัติทางกล

การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile testing)

นำชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR หรือกลีเซอรอล ปริมาณต่างๆ กันที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดด้วยความดันมาทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง ด้วยเครื่อง Cometech Universal Testing รุ่น QC-506M1 ของบริษัท Cometech ประเทศไต้หวัน ดังรูปที่ 18 ทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D638 [24] ชิ้นงานทดสอบมีรูปทรงแบบดรัมเบล แบบ Type IV ดังแสดงใน รูปที่ 19 มีระยะความยาวเกจ 25 มิลลิเมตร สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ มีรายละเอียดดังนี้ คือ ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของหัวจับชิ้นงาน 50 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จำนวนชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแต่ละสูตร คือ 7 ชิ้นงานทดสอบ และทำการรายงานผลการทดสอบ ประกอบด้วย ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึง (Tensile modulus) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break)



รูปที่ 18 เครื่อง Comotech Universal Testing รุ่น QC-506M1 ของบริษัท Comotech ประเทศไต้หวัน



รูปที่ 19 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง

การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact testing)

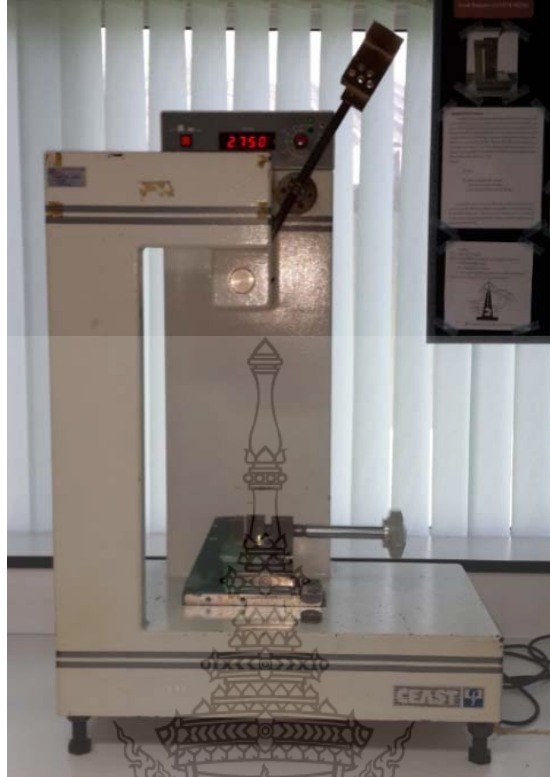
นำชิ้นงานWG ที่มีการเติมยาง ENR หรือกลีเซอรอล ปริมาณต่างๆ กัน ที่ได้มาจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดด้วยความดัน ที่มีขนาดชิ้นงาน 13 x 64 x 3 มิลลิเมตร³ มาทำรอยบาก (notch) ด้วยเครื่องทำรอยบาก ดังรูปที่ 20 จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทำรอยบากแล้ว ดังรูปที่ 21 มาทำการวัดความหนาของชิ้นงาน หลังจากนั้นนำชิ้นงาน WG มาทำการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกด้วยวิธีการทดสอบ แบบ Izod อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D256 [26] ทำการทดสอบด้วยเครื่อง CEAST® Resil Impactor รุ่น 6545 ของบริษัท Torino ประเทศอิตาลี ดังแสดงในรูปที่ 22 หลังจากนั้นทำการรายงานผลความต้านทานแรงกระแทก โดยการรายงานเป็นค่าพลังงานที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักต่อความหนาของชิ้นงานทดสอบ จำนวนชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแต่ละสูตร คือ 7 ชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 20 เครื่องทำรอยบาก สำหรับเตรียมชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทก



รูปที่ 21 ลักษณะตัวอย่างของชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงกระแทก



รูปที่ 22 เครื่อง CEAST® Resil Impactor รุ่น 6545 ของบริษัท Torino ประเทศอิตาลี

➤ สมบัติทางความร้อน

การหาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วด้วยเทคนิคทางกลเชิงไดนามิก (Dynamic Mechanical Analysis, DMA)

อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) และลักษณะพฤติกรรมวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic behavior) ของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR หรือกลีเซอรอล ปริมาณต่างๆ กัน ถูกตรวจสอบด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น DMA 242 E Artemis ของบริษัท NETZSCH ประเทศเยอรมัน ดังแสดงในรูปที่ 23 ชิ้นงานทดสอบถูกเตรียมในลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม โดยมีความกว้าง x ความยาว x ความหนา $13 \times 64 \times 3$ มิลลิเมตร³ ทดสอบโดยใช้ โหมด Dual Cantilever ทำการทดสอบภายใต้สภาวะกึ่งไซโนไดรเจน ช่วงอุณหภูมิการทดสอบ คือ -100 ถึง 150 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 3 องศาเซลเซียส/นาที ความถี่และ % ความเครียด (%strain) ของการทดสอบ คือ 1 Hz และ 0.01% ตามลำดับ และทำการรายงานผลค่า T_g ณ ตำแหน่ง $\tan \delta_{\max}$



รูปที่ 23 เครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer รุ่น DMA 242 E Artemis ของบริษัท NETZSCH

การหาค่าอุณหภูมิการสลายตัวโดยการวิเคราะห์ด้วยเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)

สำหรับการวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition Temperature, T_d) ของชิ้นงาน WG ที่มีผลมาจากการเติมยาง ENR หรือกลีเซอรอล สามารถดำเนินการได้โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น TG 209 F3 Tarsus ของบริษัท NETZSCH ประเทศเยอรมัน ดังแสดงในรูปที่ 24 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ ช่วงอุณหภูมิการทดสอบ คือ 100 ถึง 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ทำการทดสอบภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน ปริมาณชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ประมาณ 10 มิลลิกรัม



รูปที่ 24 เครื่อง Thermogravimetric analyzer รุ่น TG 209 F3 Tarsus ของบริษัท NETZSCH

➤ สมบัติทางกายภาพ

การดูดซับความชื้น หรือการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ดำเนินการโดยนำชิ้นงาน WG แต่ละสูตร จำนวน 3 ชิ้นงาน ที่มีขนาดของชิ้นงานทดสอบ คือ $13 \times 64 \times 3$ มิลลิเมตร³ ดังแสดงในรูปที่ 25 นำมาอบไล่ความชื้นในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานแห้งด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล แบบทศนิยม 2 ตำแหน่ง นำชิ้นงานแห้งแช่ในน้ำที่ผ่านกระบวนการขจัดไอออนออกจากน้ำ (Deionized water) ดังแสดงในรูปที่ 26 หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างชิ้นงานที่เวลาแช่น้ำต่างๆ กัน คือ 0 15 30 45 60 120 180 360 540 1440 2880 4320 5760 และ 7200 นาที เพื่อทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานเปียก โดยนำชิ้นงานทดสอบออกจากน้ำ และทำการซับด้วยกระดาษซับก่อนชั่งน้ำหนัก และทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ ดังสมการที่ 1



รูปที่ 25 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ



รูปที่ 26 ชิ้นงาน WG สูตรต่างๆ ที่ถูกแช่ในน้ำที่ผ่านกระบวนการขจัดไอออนออกจากน้ำ

$$\% \text{water absorption} = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ W_t คือ น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่น้ำ ณ เวลา t

W_0 คือ น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการอบ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

➤ สัณฐานวิทยา

การตรวจสอบการกระจายตัวของเฟสของเฟสยาง ENR หรือกลีเซอรอลในชิ้นงาน WG ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

การตรวจสอบการกระจายตัวของเฟสยาง ENR หรือกลีเซอรอลในชิ้นงาน WG รวมถึงความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของเฟส WG และยาง ENR หรือกลีเซอรอล ดำเนินการโดยการวิเคราะห์จากรอยแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทก การเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบต้องนำชิ้นงานมาทำการเคลือบด้วยทองคำด้วยวิธีการ sputtering หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบ Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6610LV ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 27 ที่ความต่างศักย์ 15 kv ณ กำลังขยาย 100 และ 1,000 เท่า



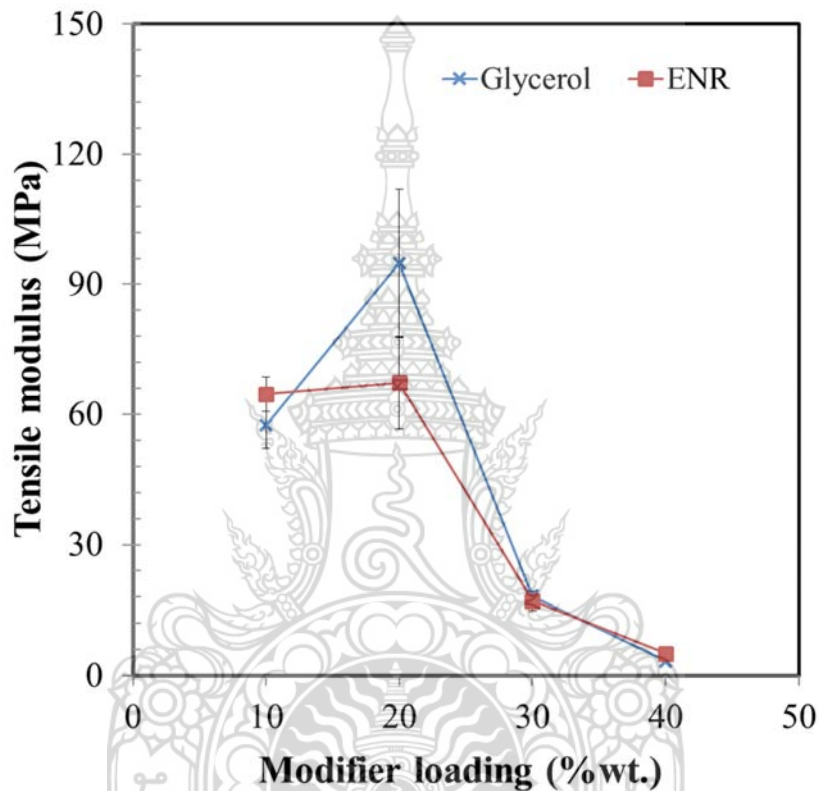
รูปที่ 27 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบ SEM ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6610LV

3.3.2 วิธีการศึกษาผลของการใช้ยางธรรมชาติที่ดัดแปรผสมกับกลีเซอรอลที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติของโปรตีนกลูเตน

สำหรับงานวิจัยในส่วนนี้ดำเนินการโดยการเลือกสูตรการยาง ENR ที่มีสมบัติโดยรวมเหมาะสมที่สุดจากการศึกษาวิจัยในหัวข้อที่ 3.3.1 มาทำการศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างยาง ENR และกลีเซอรอลในการปรับปรุงสมบัติของ WG ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยในหัวข้อที่ 3.3.1 พบว่า กรณีการเติมยาง ENR 30 % โดยน้ำหนัก มีสมบัติโดยรวมที่ดีที่สุด ดังนั้นงานวิจัยในส่วนนี้จึงทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยน้ำหนัก ระหว่าง WG:ENR:กลีเซอรอล ดังนี้ คือ 70:30:0 70:25:5 70:20:10 70:15:15 และ 70:10:20 สำหรับขั้นตอนการผสม การขึ้นรูปขึ้นงาน และการทดสอบสมบัติ มีรายละเอียดการดำเนินการเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.3.1

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

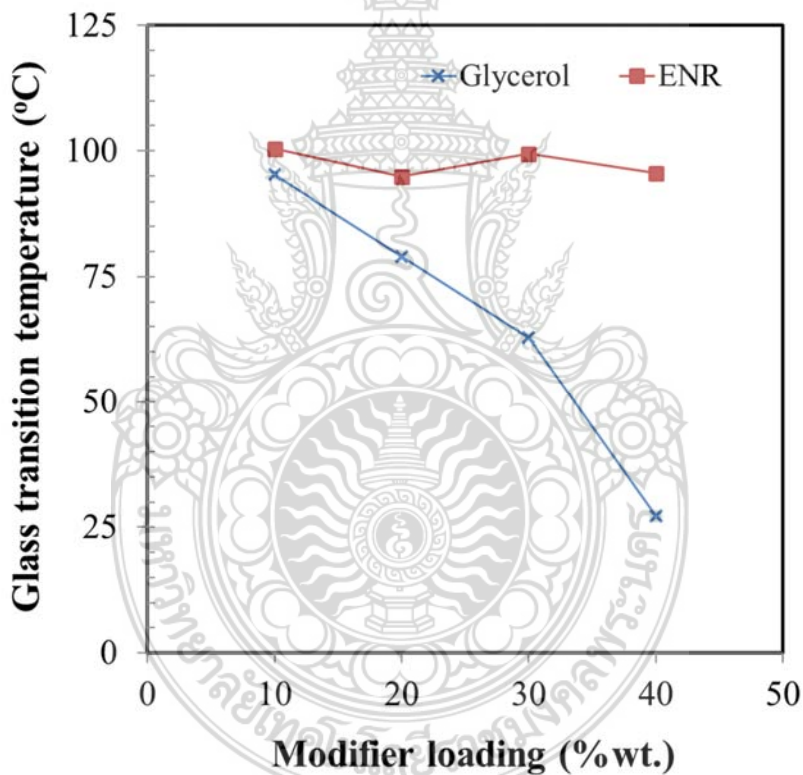
4.1 ผลการศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติตัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติโพรตีนกลูเตนแทนการใช้กลีเซอรอล



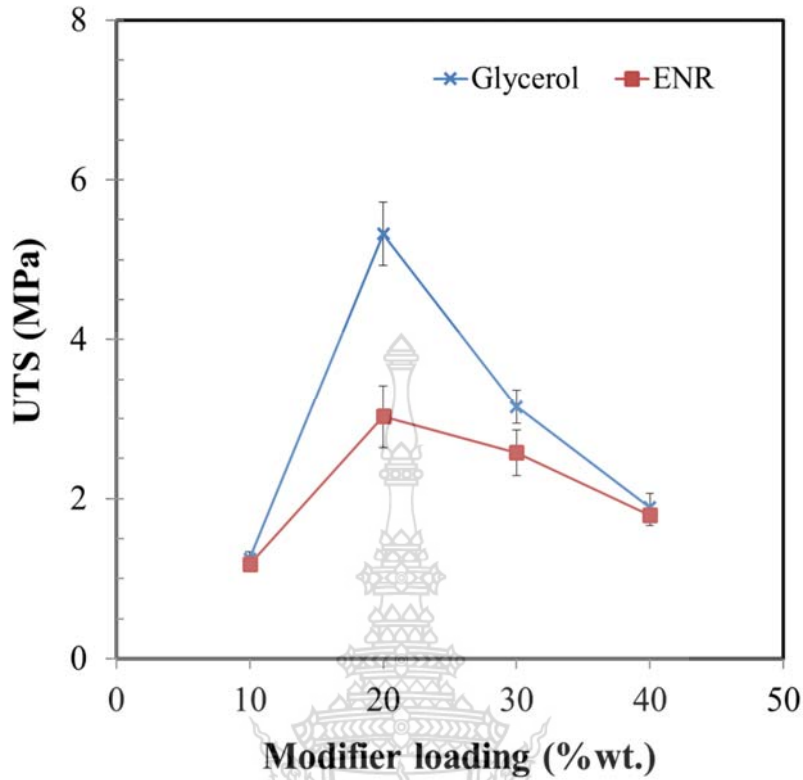
รูปที่ 28 ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับกรณีการเติมกลีเซอรอล

รูปที่ 28 แสดงผลของค่ามอดูลัสการทดสอบแรงดึงของ WG ที่มีการเติมเฟสยาง ENR เปรียบเทียบกับการเติมกลีเซอรอล จากผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานทดสอบ WG ที่ไม่มีการเติมสารปรับปรุงไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ เนื่องจาก WG เมื่อได้รับความร้อนในระหว่างการขึ้นรูปยังมีลักษณะเป็นผงไม่เกิดการหลอมตัวเป็นชิ้นงาน กรณีการเติมกลีเซอรอลในช่วงปริมาณเริ่มต้น (10 ถึง 20 %โดยน้ำหนัก) เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่กรณีการเติมยาง ENR จาก 10 เป็น 20 %โดยน้ำหนัก ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึง ณ ปริมาณสารปรับปรุงเริ่มต้นอาจเป็นเพราะสารปรับปรุงที่เพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยทำให้สมบัติในการไหลตัวของ WG ดีขึ้น จึงปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูปของ WG ให้สามารถหลอมรวมตัว

กันได้ดีขึ้น แต่เมื่อปริมาณสารปรับปรุงมากกว่า 20 %โดยน้ำหนัก พบว่า ทั้งยาง ENR หรือกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น ยังมีผลทำให้ค่าความคงรูปร่างลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ของ WG จึงทำให้ชิ้นงาน WG ที่เติมกลีเซอรอลมีความสามารถในการอ่อนตัวมากขึ้น (flexibility) ส่วนกรณีของการเติมยาง ENR ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีความยืดหยุ่น เมื่อเติมพลาสติก ENR มากขึ้นจึงทำให้ชิ้นงานมีความอ่อนตัวมากขึ้น และคำอธิบายข้างต้นนี้สามารถถูกสนับสนุนได้จากผลของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 29 จากรูปที่ 29 พบว่า การเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลมีผลทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ WG ณ ตำแหน่ง $Tan \delta_{max}$ ซึ่งได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค DMA มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน จากอุณหภูมิ 95 เป็น 25 องศาเซลเซียส เมื่อเติมกลีเซอรอล 10 ถึง 40 %โดยน้ำหนัก ในขณะที่การเติมพลาสติกยาง ENR มีผลทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ WG มีแนวโน้มลดลงประมาณ 5 องศาเซลเซียส

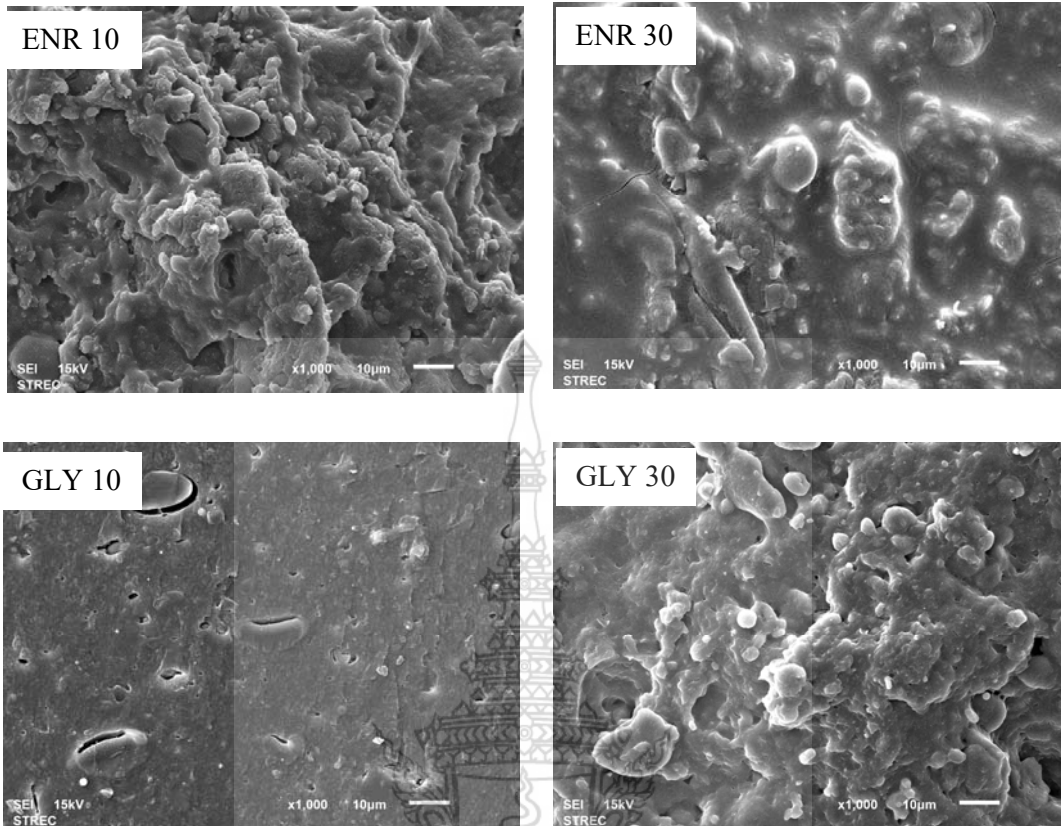


รูปที่ 29 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ WG เมื่อเติมยาง ENR หรือกลีเซอรอลปริมาณต่างๆ กัน



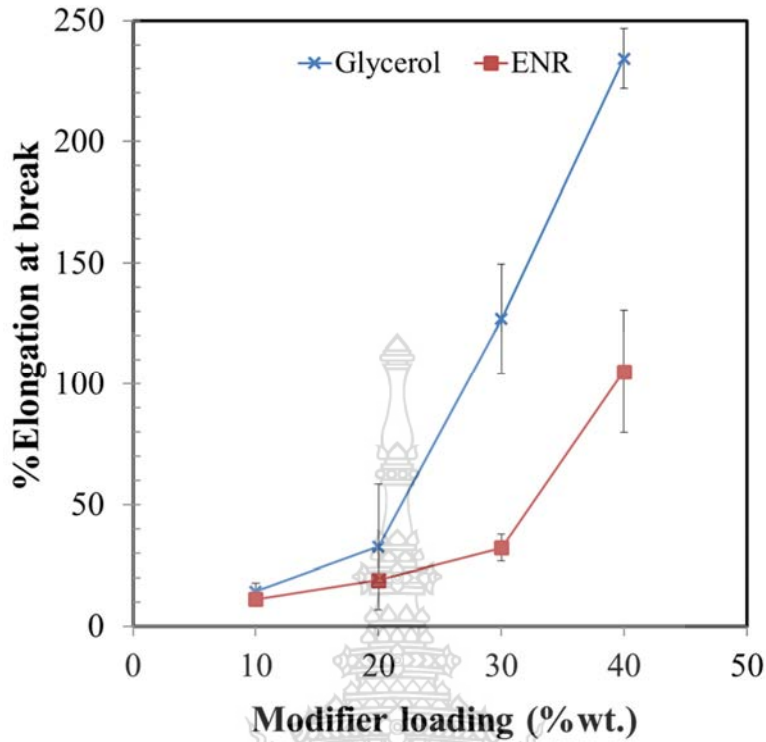
รูปที่ 30 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับกรณีการเติมกลีเซอรอล

ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงาน WG ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการเพิ่มปริมาณยาง ENR หรือกลีเซอรอล ดังแสดงในรูปที่ 30 มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึง การเพิ่มปริมาณสารปรับปรุงในปริมาณเริ่มต้นมีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้มีสาเหตุเช่นเดียวกับกรณีค่ามอดูลัส ส่วนเมื่อเติมสารปรับปรุงปริมาณมากมีแนวโน้มทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณสารปรับปรุงที่เพิ่มขึ้นเข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลของ WG ทำให้แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่ลดลง นำไปสู่การลดความสามารถในการรับแรง สำหรับผลของชนิดสารปรับปรุงพบว่า กลีเซอรอลมีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่ามากกว่ากรณีการเติมยาง ENR ทั้งนี้อาจเป็นเพราะกลีเซอรอลเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจึงเข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลของ WG ได้ดีกว่ายาง ENR ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดการแยกเฟสกับ WG และจากผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา ดังแสดงในรูปที่ 31 พบว่า กรณีการเติมยาง ENR สามารถสังเกตเห็นการแยกเฟสระหว่าง ENR และ WG ในขณะที่กรณีกลีเซอรอลไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างเฟสเกิดขึ้น นอกจากนี้ยาง ENR เป็นวัสดุยางจึงมีพฤติกรรมเป็นยาง ซึ่งสามารถดึงยืดได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำ

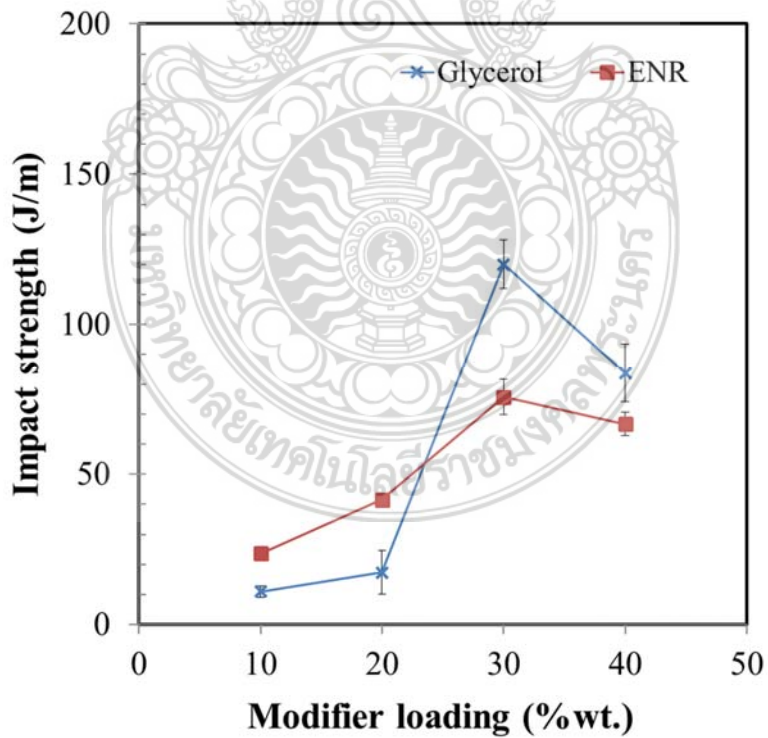


รูปที่ 31 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ณ บริเวณรอยแตกหักของชิ้นงาน WG ที่มีการกลีเซอรอล หรือยาง ENR ปริมาณ 10 และ 30 %โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทก ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

รูปที่ 32 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมสารปรับปรุง ปริมาณ ตั้งแต่ 10-40 %โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่า ทั้งกรณีการเติมกลีเซอรอล และยาง ENR มีผลทำให้ความสามารถในการยึดตัวของชิ้นงาน WG มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณของสารปรับปรุงเพิ่มสูงขึ้น มีเหตุผลเช่นเดียวกับที่อธิบายมาข้างต้น และผลของการเติมกลีเซอรอลมีผลมากกว่ากรณียาง ENR ทั้งนี้อาจเป็นเพราะกลีเซอรอลมีผลทำให้ WG มีสมบัติเหมือนยางมากกว่ากรณีการเติมยาง ENR โดยพิจารณาได้จากการลดลงของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ WG



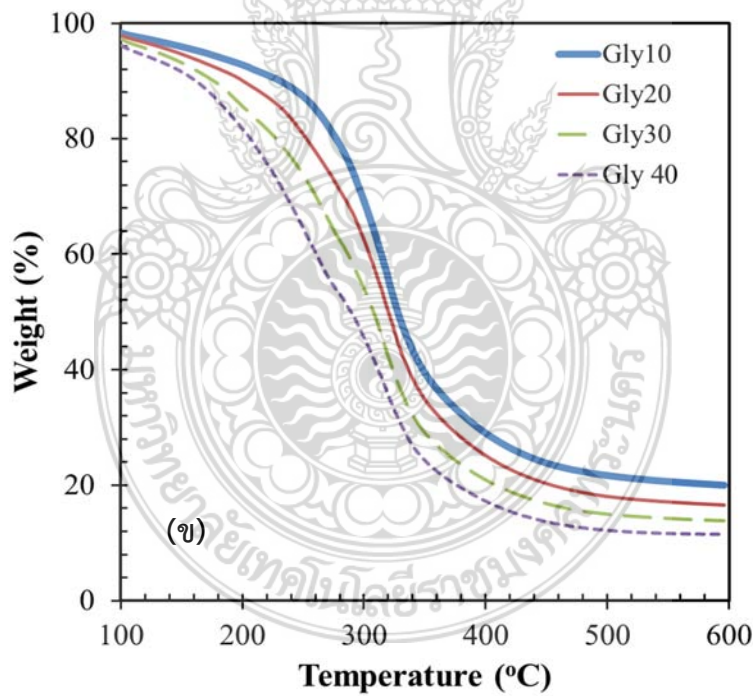
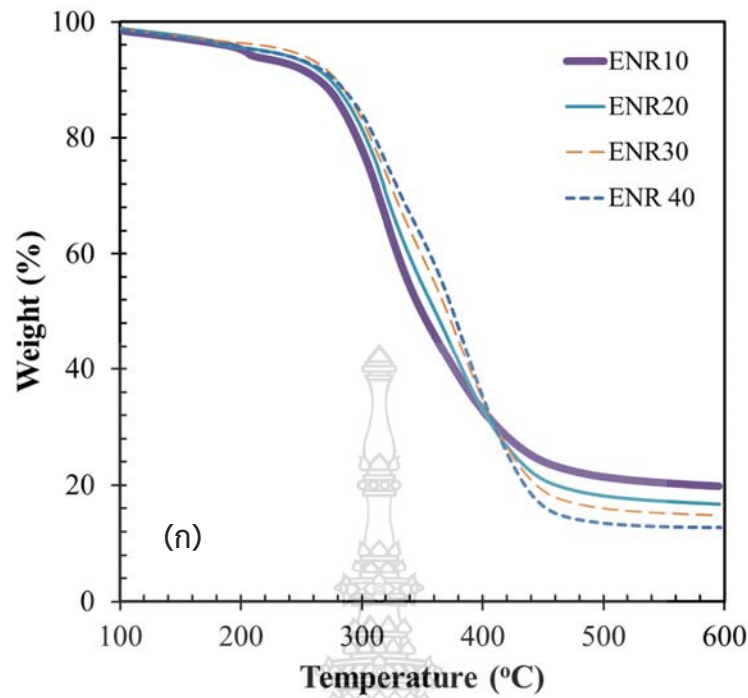
รูปที่ 32 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR หรือกลีเซอรอล ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 33 ค่าความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR หรือกลีเซอรอล ปริมาณต่างๆ กัน

รูปที่ 33 แสดงค่าความต้านแรงกระแทกที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมกลีเซอรอล หรือยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน พบว่า การเติมกลีเซอรอล หรือยาง ENR ลงใน WG มีผลในการช่วยปรับปรุง ความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงาน WG กรณีการเติมสารปรับปรุงปริมาณเริ่มต้น (10 – 20 %โดย น้ำหนัก) พบว่า ยาง ENR มีผลในการปรับปรุงสมบัติความต้านทานแรงกระแทกได้ดีกว่ากรณีกลีเซอรอล ขณะที่ปริมาณสารปรับปรุงปริมาณสูง (30 – 40 %โดยน้ำหนัก) พบว่า กรณีการเติมกลีเซอรอลมีผลทำให้ค่า ความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงาน WG มีค่าสูงกว่ากรณีการเติมยาง ENR ผลที่เกิดขึ้นสำหรับกรณีสาร ปรับปรุงปริมาณเริ่มต้นอาจเกิดขึ้นเนื่องจากยาง ENR เป็นยางจึงมีส่วนช่วยในการรับแรงกระแทก ในขณะที่ สารปรับปรุงปริมาณสูง พบว่า กรณีการเติมกลีเซอรอลมีผลในการช่วยปรับปรุง WG ให้มีความยืดหยุ่นเพิ่ม มากขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเติมยาง ENR โดยพิจารณาได้จากการลดลงของอุณหภูมิ การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และการเพิ่มของความสามารถในการยืดตัว ณ จุดขาดที่สูงขึ้นสำหรับกรณีการ เติมกลีเซอรอล ปริมาณ 30 และ 40 %โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 29 และ 32 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่าง อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเติมยาง ENR

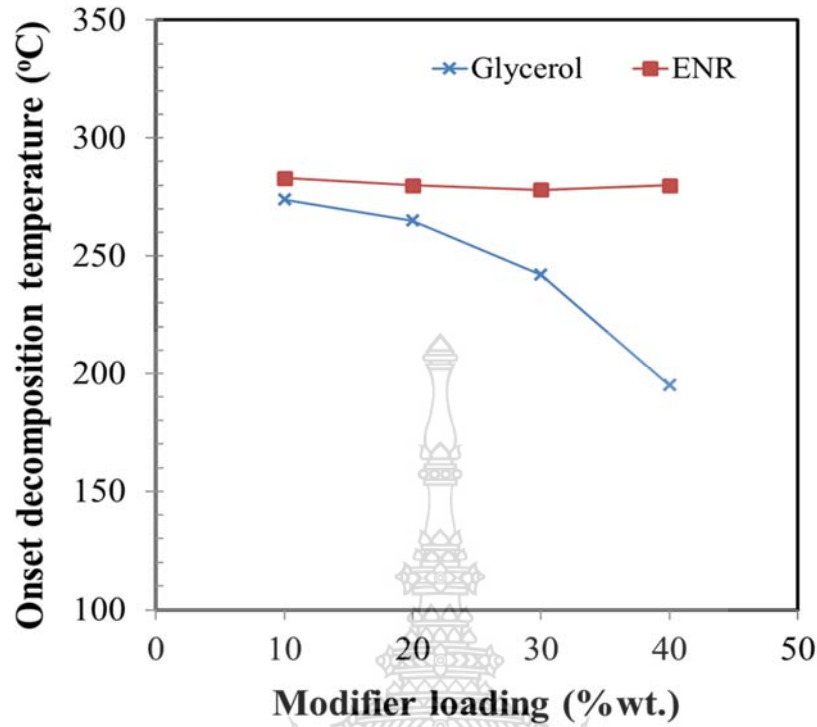
รูปที่ 34 พบว่า ชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR มีแนวโน้มเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนไม่ เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มขึ้นจาก 10 ถึง 40 %โดยน้ำหนัก ในขณะที่ชิ้นงาน WG ที่มี การเติมกลีเซอรอลมีแนวโน้มเกิดการสลายตัวได้ง่ายขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะ กลี เซอรอลสามารถเกิดการสลายตัวได้ที่อุณหภูมิประมาณ 199 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน [26] ในขณะที่ยาง ENR มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ประมาณ 415 องศาเซลเซียส [27] ส่วนรูปที่ 35 แสดง อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนเริ่มต้นของชิ้นงาน WG พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน เริ่มต้นสำหรับกรณีการเติมยาง ENR มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่กรณีการเติมกลีเซอรอลมีผลทำให้ ชิ้นงานเกิดการสลายตัวได้รวดเร็วมากขึ้น ทั้งนี้สาเหตุเป็นเช่นเดียวกับที่อธิบายในรูปที่ 34



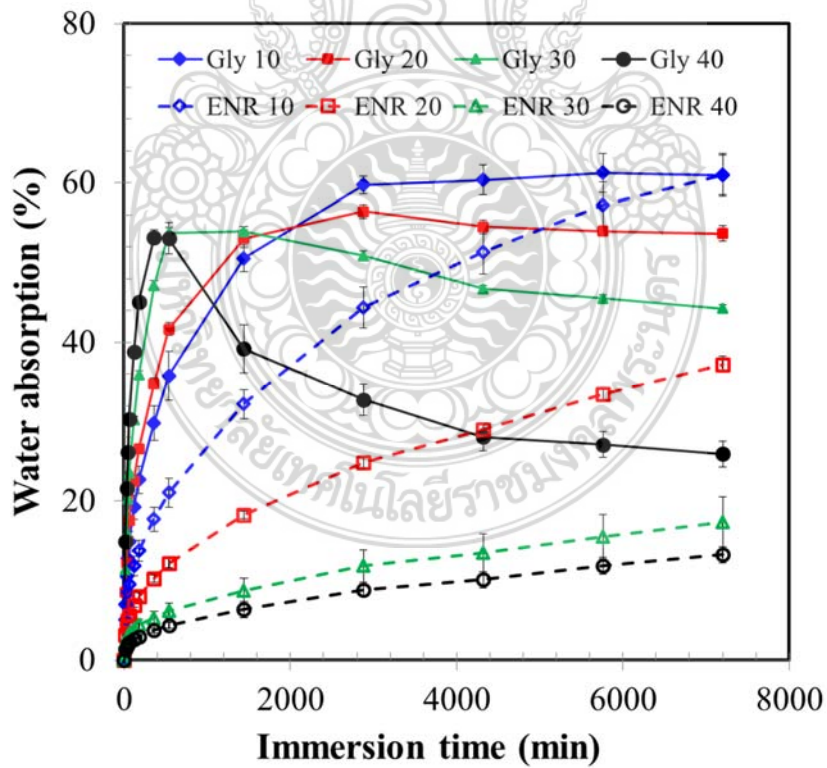
รูปที่ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงาน WG และอุณหภูมิสำหรับกรณีการเติม ENR และกลีเซอรอล

(ก) กรณีการเติมยาง ENR

(ข) กรณีการเติมกลีเซอรอล



รูปที่ 35 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนเริ่มต้นของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR เปรียบเทียบกับการเติมกลีเซอรอล

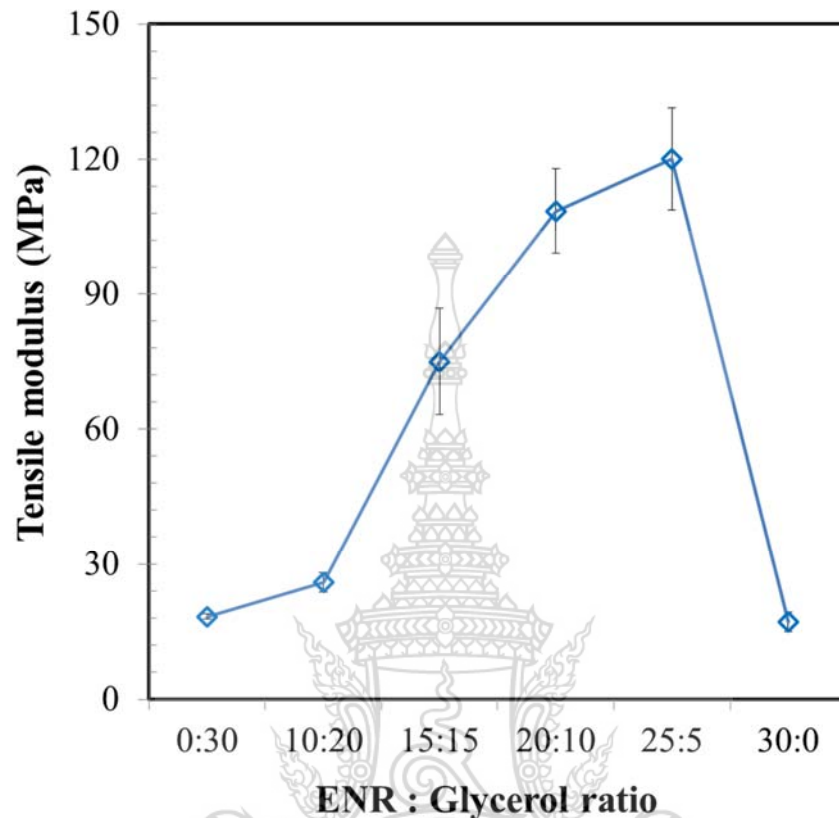


รูปที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมสารปรับปรุงปริมาณและเวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน

รูปที่ 36 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงาน WG ณ เวลาในการแช่ชิ้นงานต่างๆ กัน จากผลการทดลองพบว่า กรณีการเติมยาง ENR เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น อัตราของการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น และผลของการเพิ่มปริมาณยาง ENR มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลง การลดลงของค่าการดูดซึมน้ำยังแตกต่างกันชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณยาง ENR ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้สัดส่วนที่ไม่ชอบน้ำเพิ่มสูงขึ้น (ยาง ENR เป็นวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ แต่ WG เป็นวัสดุที่ชอบน้ำ) นอกจากนี้การเติมยาง ENR ที่มากขึ้นมีผลทำให้ชิ้นงานมีเนื้อที่แน่นขึ้น เพราะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ง่ายขึ้น การซึมผ่านของน้ำจึงเกิดได้ยากขึ้น ส่วนกรณีการเติมกลีเซอรอล พบว่า ปริมาณการดูดซึมน้ำในช่วงเวลาการแช่ชิ้นงานเริ่มต้น (0-540 นาที) มีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และปริมาณกลีเซอรอลที่มากขึ้นมีผลทำให้การดูดซึมน้ำในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์จึงทำให้ช่องว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ WG มีมากขึ้น โมเลกุลน้ำจึงสามารถแพร่เข้าไปในชิ้นงานได้มากขึ้น แต่เมื่อเวลาการแช่ชิ้นงานมากกว่า 540 นาที พบว่า ปริมาณการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง และเริ่มดูดซึมน้ำด้วยค่าที่คงที่ สำหรับกรณีปริมาณกลีเซอรอล 10 %โดยน้ำหนัก ส่วนกรณีปริมาณกลีเซอรอล 20 – 40 %โดยน้ำหนักเริ่มสังเกตเห็นการลดลงของเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานที่ 2880 นาที ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมีค่าลดลงมากขึ้น เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก WG และกลีเซอรอลบางส่วนถูกละลายออกจากชิ้นงาน จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำชี้ให้เห็นว่า การปรับปรุง WG ด้วยการเติมยาง ENR มีส่วนช่วยทำให้ชิ้นงาน WG มีความทนต่อน้ำมากกว่ากรณีการเติมกลีเซอรอล

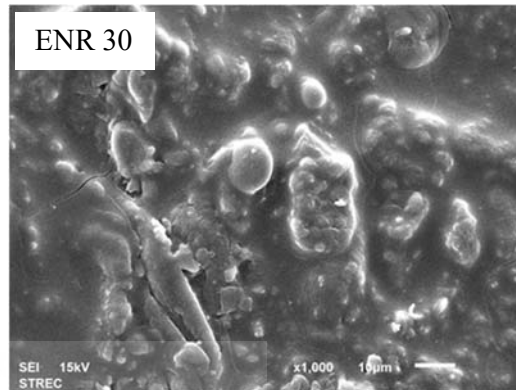
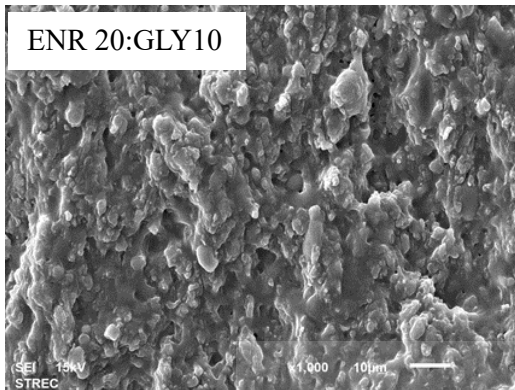
จากการพิจารณาผลการทดลองทั้งหมดของงานวิจัยในส่วนที่ 1 พบว่า สัดส่วนของยาง ENR ที่เหมาะสมในการนำมาปรับปรุงความเปราะ และความสามารถในการขึ้นรูป คือ ปริมาณยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก เนื่องจากกรณีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก มีค่าความทนแรงกระแทกสูงที่สุด ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดสูงกว่ากรณีการเติมยาง ENR 10 และ 40 %โดยน้ำหนัก และมีค่าไม่แตกต่างจากกรณีการเติมยาง ENR 20 %โดยน้ำหนักมากนัก และจากการเตรียมชิ้นงานในระหว่างการขึ้นรูปสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์เช่นเดียวกับกรณีการเติมยาง ENR 20 %โดยน้ำหนัก และแต่ขึ้นรูปได้ง่ายกว่า

4.2 ผลการศึกษาผลของการใช้ยางธรรมชาติดัดแปรผสมกับกลีเซอรอลที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติของโพรตีนกลูเตน



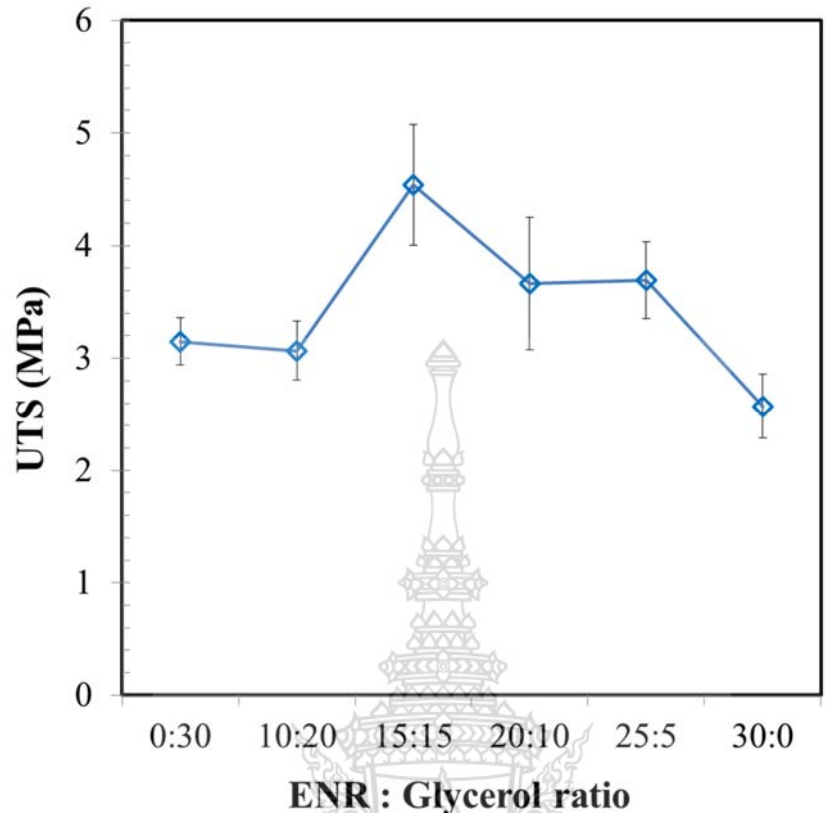
รูปที่ 37 ผลของการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล อัตราส่วนต่างๆ กันที่มีต่อค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงของชิ้นงาน WG

ผลของการนำยาง ENR และกลีเซอรอลมาใช้ร่วมกันเพื่อปรับปรุงสมบัติของ WG โดยการเติมยาง ENR และกลีเซอรอลรวมกัน 30 %โดยน้ำหนัก โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสม รูปที่ 37 แสดงค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล อัตราส่วนต่างๆ กัน จากผลการทดลองพบว่า เมื่อนำยาง ENR มาผสมกับกลีเซอรอลมีผลทำให้ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นมากกว่ากรณีการเติมยาง ENR หรือกลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากลีเซอรอลช่วยเสริมการทำงานของยาง ENR และเมื่ออัตราส่วนยาง ENR ต่อกลีเซอรอลมากขึ้นมีผลทำให้ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อสัดส่วนของกลีเซอรอลซึ่งเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่ายาง ENR มีปริมาณลดลงจึงทำให้ความยืดหยุ่นของ WG มีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย และจากรูปที่ 38 แสดงให้เห็นว่าการมีอยู่ของกลีเซอรอลมีส่วนช่วยทำให้เฟสของยาง ENR เกิดการกระจายตัวได้ดีขึ้น จึงช่วยเสริมความสามารถในการรับแรงให้มีค่ามากขึ้น โดยพบว่า เฟสของยาง ENR ในชิ้นงาน WG ที่มีการเติมกลีเซอรอลมีขนาดอนุภาคเล็กลงกว่ากรณีที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอล



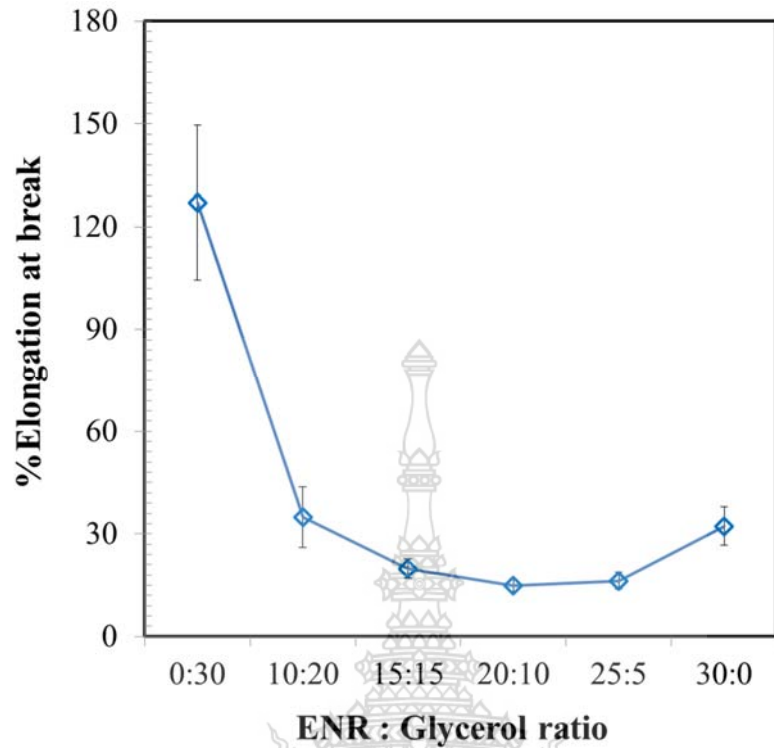
รูปที่ 38 ภาพสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงาน WG ที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทกสำหรับกรณี ชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR 20 %โดยน้ำหนัก และกลีเซอรอล 10 %โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับกรณี การเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก

สำหรับผลของการเติมยาง ENR และกลีเซอรอลอัตราส่วนต่างๆ กันที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรง ดึงสูงสุด ดังแสดงใน**รูปที่ 39** พบว่า กรณีการเติมยาง ENR ผสมกับกลีเซอรอลมีแนวโน้มปรับปรุงค่าความ ต้านทานแรงดึงสูงสุด และเมื่ออัตราส่วนของยาง ENR เพิ่มขึ้นไม่เกิน 15 %โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ค่าความ ต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณยาง ENR มากกว่า 15 %โดยน้ำหนัก เริ่มสังเกตพบการลดลงของ ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ณ ปริมาณยาง ENR ไม่เกิน 15 %โดยน้ำหนัก อาจเนื่องมาจากการมีอยู่ของกลีเซอรอลช่วยให้ยาง ENR กระจายตัวได้ดีขึ้น จึงช่วยรับแรง ได้มากขึ้น ส่วนกรณีการลดลงของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเมื่อปริมาณยาง ENR มากกว่า 15 %โดย น้ำหนัก อาจเนื่องมาจากยาง ENR เป็นวัสดุประเภทยาง เมื่อเพิ่มสัดส่วนยางมากขึ้นจึงทำให้วัสดุสามารถยึด ตัวได้ง่ายขึ้น

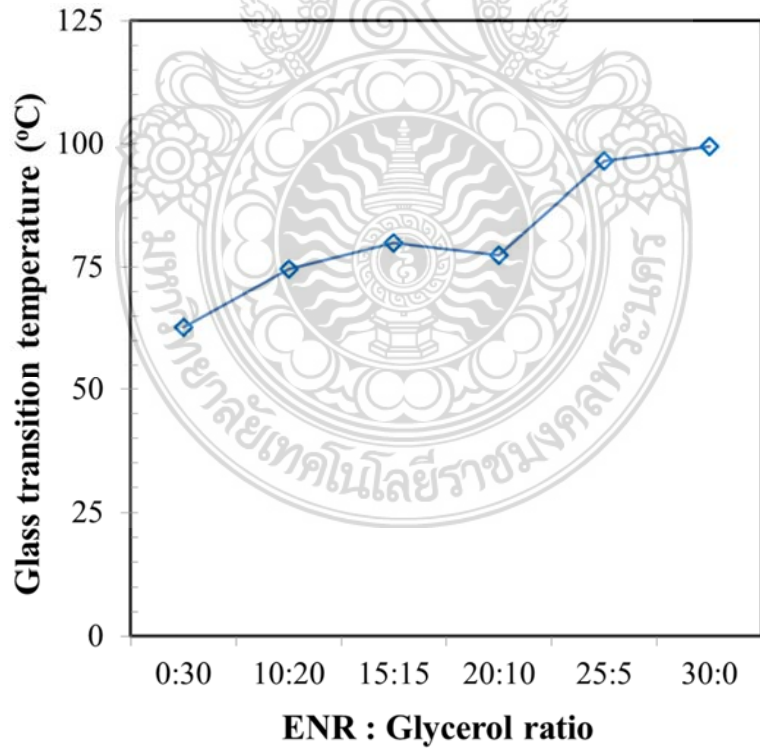


รูปที่ 39 ผลของการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล อัตราส่วนต่างๆ กันที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงาน WG

รูปที่ 40 แสดงความสามารถในการยึดตัวของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล ในอัตราส่วนต่างๆ กัน จากผลการทดลองพบว่า การยึดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการเติมยาง ENR ลงไปผสมกับกลีเซอรอล ทั้งนี้อาจเป็นเพราะกลีเซอรอลซึ่งเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่มีประสิทธิภาพที่ดีมีปริมาณลดลง และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ WG ดังแสดงในรูปที่ 41 พบว่า ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับคำอธิบายข้างต้น โดยพบว่าเมื่อมีการเติมยาง ENR ผสมกับกลีเซอรอลมีผลทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ WG มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณยาง ENR มากขึ้น

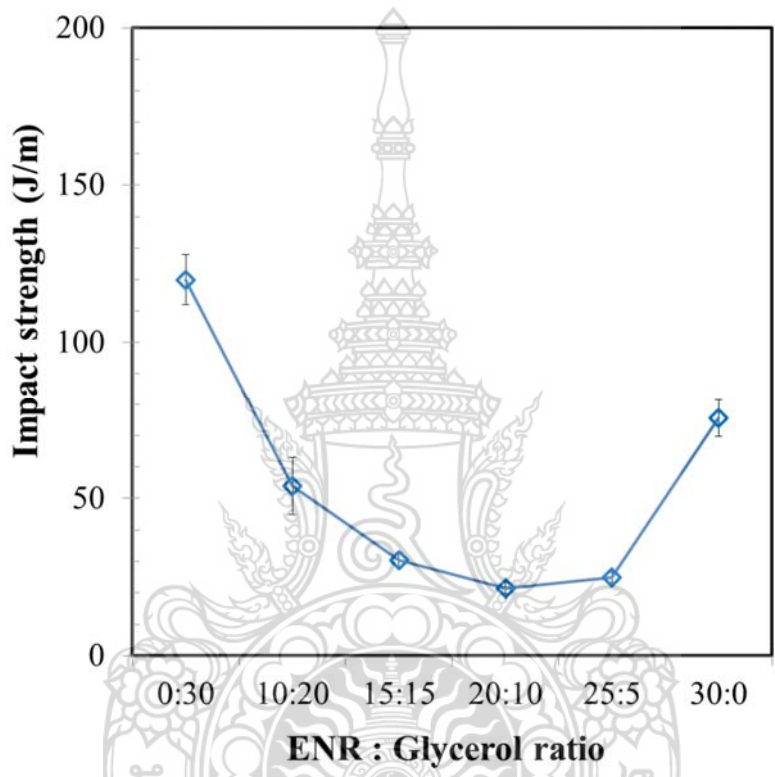


รูปที่ 40 การเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดสำหรับชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล อัตราส่วนต่างๆ กัน



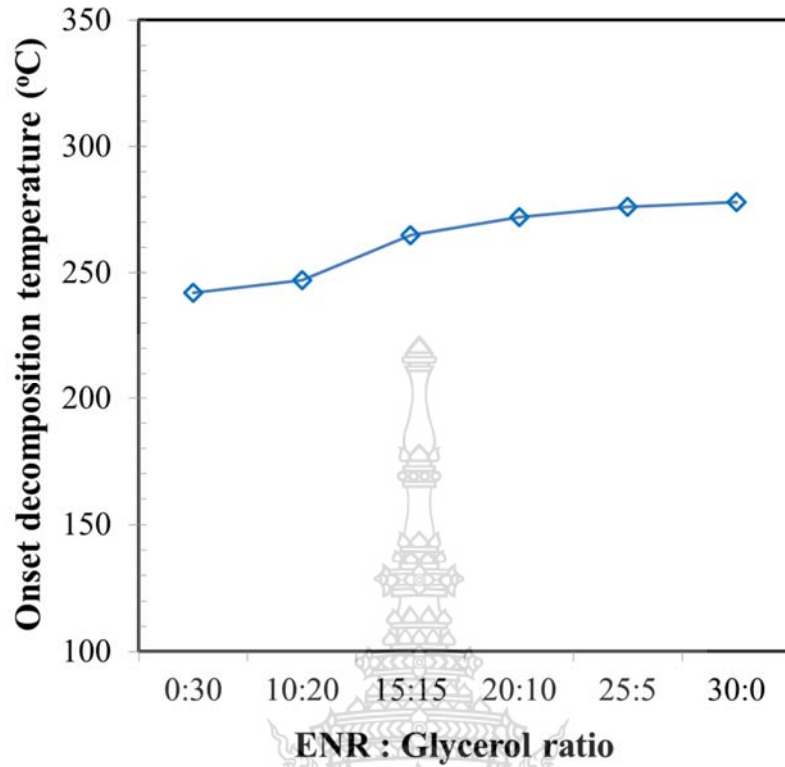
รูปที่ 41 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ WG ที่มีการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล อัตราส่วนต่างๆ กัน

ผลของการเติมยาง ENR ผสมกับกลีเซอรอลที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงาน WG เป็นดังแสดงในรูปที่ 42 พบว่า การผสมยาง ENR และกลีเซอรอลมีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกมีค่าต่ำกว่ากรณีการเติมกลีเซอรอล หรือยาง ENR เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเช่นเดียวกับกรณีค่าความสามารถในการยึดตัว ณ จุดขาด และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 40 และ 41 ตามลำดับ

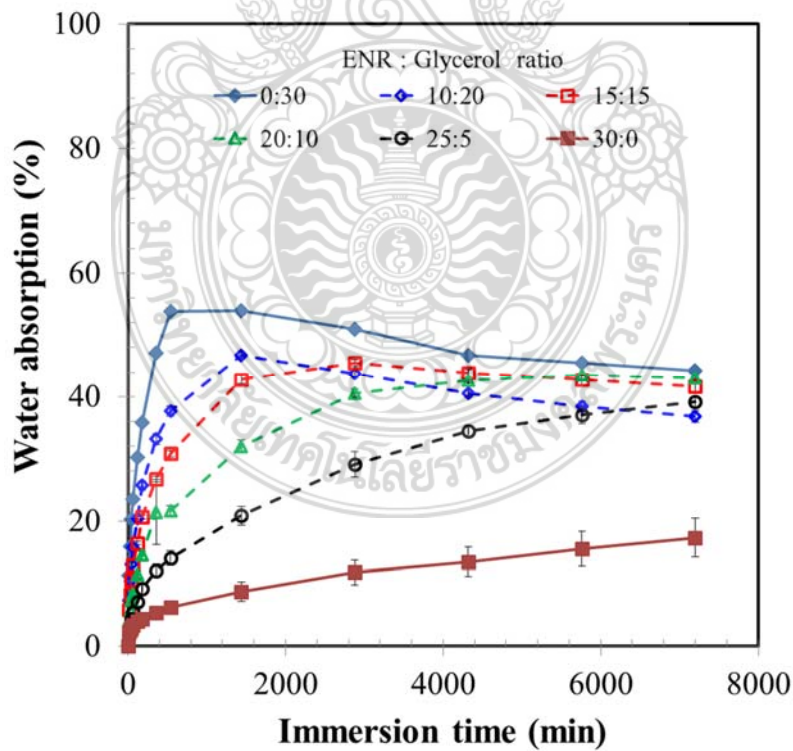


รูปที่ 42 ค่าความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล อัตราส่วนต่างๆ กัน

อุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR และกลีเซอรอลอัตราส่วนต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 43 พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อสัดส่วนของยาง ENR เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะยาง ENR มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่ากลีเซอรอล [26-27]



รูปที่ 43 ค่าอุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล อัตราส่วนต่างๆ กัน



รูปที่ 44 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล อัตราส่วนต่างๆ กัน

รูปที่ 44 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงาน WG ที่มีการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล อัตราส่วนต่างๆ กัน จากผลการทดลองพบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำทุกสูตรมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น แต่จากกราฟสังเกตพบว่า เมื่อสัดส่วนยาง ENR เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้การดูดซึมน้ำมีลดลง ทั้งนี้มีสาเหตุเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้ในรูปที่ 36 ในงานวิจัยส่วนที่หนึ่ง และพบว่าลักษณะของกราฟการดูดซึมน้ำแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ อัตราส่วนยาง ENR : กลีเซอรอล 0:30 10:20 และ 15:15 มีแนวโน้มการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาเริ่มต้น แต่เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานมากกว่า 2880 นาที ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเริ่มค่าลดลง เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสัดส่วนกลีเซอรอลที่เป็นสารชอบน้ำมีมากขึ้น จึงทำให้เพิ่มโอกาสที่กลีเซอรอล และ WG ถูกละลายออกจากชิ้นงานได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งพฤติกรรมการดูดซึมน้ำดังกล่าวนี้ถูกพบเช่นเดียวกับกรณีการเติมกลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว ซึ่งได้อธิบายไว้ในรูปที่ 36 ส่วนกรณีอัตราส่วนยาง ENR : กลีเซอรอลสัดส่วนที่มากขึ้น 20:10 25:5 และ 30:0 มีพฤติกรรมการดูดซึมน้ำเช่นเดียวกับกรณีการเติมยาง ENR เพียงอย่างเดียว คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเพิ่มสูงขึ้นในช่วงเวลาการแช่น้ำเริ่มต้น และเริ่มมีแนวโน้มค่าคงที่ เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานมากกว่า 5760 นาที



บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผล

5.1 การศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติตัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติโปรตีนกลูเตนแทนการใช้กลีเซอรอล

งานวิจัยในส่วนนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณยาง ENR และกลีเซอรอล ตั้งแต่ 10 ถึง 40 %โดยน้ำหนัก และทำการประเมินสมบัติความต้านทานแรงดึง แรงกระแทก ลักษณะทางสัณฐานวิทยา อุณหภูมิ การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อน และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- สมบัติทางกล พบว่า ทั้งกรณีการเติมยาง ENR และกลีเซอรอลมีผลทำให้ค่ามอดูลัส และค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณสารปรับปรุงเพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีการเติมสารปรับปรุง 10 %โดยน้ำหนัก มีสาเหตุมาจากความไม่แน่นอนของเนื้อชิ้นงาน ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และค่าความต้านทานแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณพลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้น สำหรับผลของการเติมกลีเซอรอลมีผลทำให้สมบัติทางกลโดยรวมดีกว่ากรณีการเติมยาง ENR
- สมบัติทางความร้อน พบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าลดลง ทั้งกรณีการเติมยาง ENR และกลีเซอรอล โดยกลีเซอรอลมีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์มากกว่ายาง ENR ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อน พบว่า การเติมยาง ENR ไม่มีผลทำให้การสลายตัวเนื่องจากความร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลง ขณะที่กรณีการเติมกลีเซอรอลมีผลทำให้อุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อนลดลง เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้น
- ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่า ยาง ENR เกิดการแยกเฟสจาก WG ในขณะที่กลีเซอรอลไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างเฟส ทั้งนี้เนื่องมาจากยาง ENR มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ จึงแทรกตัวระหว่างสายโซ่ของ WG ได้ยากกว่ากลีเซอรอล
- ความทนต่อน้ำ พบว่า การเติมยาง ENR มีผลช่วยในการปรับปรุงความทนทานต่อน้ำของ WG ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในขณะที่การเติมกลีเซอรอลมีผลทำให้ชิ้นงานเกิดการดูดซึมน้ำมากขึ้น เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้น ยิ่งทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายมากขึ้น โดยพิจารณาจากน้ำหนักชิ้นงานที่ลดลง

5.2 การศึกษาผลของการใช้ยางธรรมชาติตัดแปรผสมกับกลีเซอรอลที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติของโปรตีนกลูเตน

งานวิจัยในส่วนนี้ได้เลือกปริมาณยาง ENR ที่เหมาะสมจากงานวิจัยในส่วนแรกมาทำการศึกษาผลของการใช้ยาง ENR ร่วมกับกลีเซอรอล โดยในงานวิจัยได้เลือกยาง ENR ปริมาณ 30 %โดยน้ำหนัก มา

ทำการศึกษา โดยพิจารณาจากสมบัติโดยรวม และความสามารถในการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน งานวิจัยในส่วนนี้ ได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนยาง ENR : กลีเซอรอล ดังนี้ คือ 0:30 10:20 15:15 20:10 25:5 และ 30:0

- สมบัติทางกล พบว่า การเติมยาง ENR ร่วมกับกลีเซอรอลมีผลในการช่วยปรับปรุงแรงดึง แต่ลดความสามารถในการรับแรงกระแทก
- สมบัติทางความร้อน พบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และอุณหภูมิการสลายตัว เนื่องจากความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อสัดส่วนของยาง ENR เพิ่มขึ้น
- ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่า เฟสของยาง ENR มีขนาดเล็กกลง และกระจายตัวใน WG ได้ดีขึ้น เมื่อมีการเติมกลีเซอรอล
- ความทนต่อน้ำ พบว่า การเติมกลีเซอรอลลงไปผสมกับ WG และยาง ENR มีผลทำให้ความทนต่อน้ำ ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเติมกลีเซอรอล 20 และ 30 %โดยน้ำหนัก พบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงาน

จากงานวิจัยทั้ง 2 ส่วน สามารถสรุปสูตรที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ได้ ดังนี้

- บรรจุภัณฑ์ที่ต้องการรับแรงดึงได้ดี ควรเลือกใช้ สูตรที่ WG : ยาง ENR : กลีเซอรอล (70:25:5)
- บรรจุภัณฑ์ที่ต้องการรับแรงกระแทกได้ดี ควรเลือกใช้ สูตรที่ WG : กลีเซอรอล (70:30)
- บรรจุภัณฑ์ที่ต้องการรับแรงกระแทกได้ดี และมีความทนต่อน้ำ ควรเลือกใช้สูตร WG : ยาง ENR (70:30)

เอกสารอ้างอิง

1. Gómez-Martínez, D., Partal, P., Martínez, I. and Gallegos, C., 2013, “Gluten-based Bioplastics with Modified Controlled-release and Hydrophilic Properties”, **Industrial Crops and Product**, Vol. 43, pp. 704-710.
2. Zárata-Ramírez, L.S., Romero, A., Martínez, I., Bengoechea, C., Partal, P. and Guerrero, A., 2014, “Effect of Aldehydes on Thermomechanical Properties of Gluten-based Bioplastics”, **Food and Bioproducts Processing**, Vol. 92, pp. 20-29.
3. Jerez, A., Partal P., Martínez, I., Gallegos, C. and Guerrero, A., 2005, “Rheology and Processing of Gluten Based Bioplastics” **Biochemical Engineering Journal**, Vol. 26, pp. 131-138.
4. Song, Y. and Zheng, Q., 2008, “Improved Tensile Strength of Glycerol-plasticized Gluten Bioplastic Containing Hydrophobic Liquids”, **Bioresource Technology**, Vol. 99, pp. 7665-7671.
5. Félix, M. Martín-Alfonso, J.E., Romero, A. and Guerrero, A., 2014, “Development of Albumen/Soy Biobased Plastic Materials Processed by Injection Molding”, **Journal of Food Engineering**, Vol. 125, pp. 7-16.
6. วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2549, **ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน**, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
7. พงษ์ธร แซ่อู๋, 2548, **ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน**, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), พิมพ์ครั้งที่ 2.
8. Chen, Y.J., 2014, “Bioplastics and Their Role in Achieving Global Sustainability”, **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**, Vol. 6, pp. 226-231.
9. Gáspár, M., Benkő, Z., Dogossy, G., Réczey, K. and Czigány, T., 2005, “Reducing Water Absorption in Compostable Starch-based Plastics”, **Polymer Degradation and Stability**, Vol. 90, pp. 563-69.
10. John, M.J. and Thomas, S., 2008, “Biofibres and Biocomposites”, **Carbohydrate Polymers**, Vol. 71, pp. 343-364.
11. Jerez, A., Partal, P., Martínez, I., Gallegos, C. and Guerrero, A., 2007, “Egg White-based Bioplastics Developed by Thermomechanical Processing”, **Journal of Food Engineering**, Vol. 82, pp. 608-617.

12. แก้วตา แก้วตาทิพย์, 2556, “พลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี”, **วารสารวิทยาศาสตร์ มข.**, ปีที่ 41, ฉบับที่ 2, หน้า 309 – 319.
13. Zhang, X., Do, M.D., Kurniawan, L., Qiao, G.G., 2010, “Wheat Gluten-based Renewable and Biodegradable Polymer Materials with Enhanced Hydrophobicity by Using Epoxidized Soybean Oil as a Modifier”, **Carbohydrate Research**, Vol. 345, pp. 2174-2182.
14. Auvergne, R., Morel, M.H., Menut, P., Gianl, O., Guilbert, S. and Robin, J.J., 2008, “Reactivity of Wheat Gluten Protein During Mechanical Mixing: Radical and Nucleophilic Reactions for the Addition of Molecules on Sulfur” **Biomacromolecules**, Vol. 9, pp. 664-671.
15. Luqman, M., 2012, **Recent Advances in Plasticizers**, Intech, Croatia, pp. 141-144.
16. Hallstar, **The Function and Selection of Ester Plasticizers**
17. De, S.K. and White, J.R., 2001, **Rubber Technologist’s Handbook**, Shropshire, UK, Rapra Technology Limited.
18. Bhowmick, A.K. and Stephens, H., 2001, **Handbook of Elastomers**, New York, Marcel Dekker, Inc.
19. Hamzah, R., Bakar, M.A., Khairuddean, M., Mohammed, I.A. and Adnan, R., 2012, “A Structural Study of Epoxidized Natural Rubber (ENR-50) and Its Cyclic Dithiocarbonate Derivative Using NMR Spectroscopy Techniques”, **Molecules**, Vol. 17, pp. 10974-10993.
20. Nampitch, T. and Magaraphan, R., 2010, “The Properties of Polymer Blends between Poly(lactic) Acid and Epoxidized Natural Rubber Irradiated in the Rubber Phase”, **Proceedings of the 17th IAPRI World Conference on Packaging**, China.
21. Zhang, C., Huang, Y., Luo, C., Jiang, L. and Dan, Y., 2011, “Enhanced Ductility of Polylactide Materials: Reactive Blending with Pre-hot Sheared Natural Rubber”, **Journal of Polymer Research**, Vol. 20, pp. 1-9.
22. Bitinis, N., Sanz, A., Nogales, A., Verdejo, R., Lapez-Manchado, M.A. and Ezquerra, T.A., 2012, “Deformation Mechanisms in Poly(lactic) Acid/Natural Rubber/Organoclay Bionanocomposites as Revealed by Synchrotron X-ray Scattering”, **Soft Matter**, Vol. 8, pp. 8990-8997.
23. Wahit, M. U., Hassan, A., Ibrahim, A.N., Zawawi, N.A. and Kunasegeran, K., 2015, “Mechanical, Thermal and Chemical Resistance of Epoxidized Natural Rubber Toughened Poly(lactic) Acid Blends”, **Sains Malaysiana**, Vol. 44, pp. 1615–1623.

24. ASTM D638, 2014, **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.**
25. ASTM D256, 2003, **Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics.**
26. Jones, A., Zeller, M.A. and Sharma, S., 2013, “Thermal, Mechanical, and Moisture Absorption Properties of Egg White Protein Bioplastics with Natural Rubber and Glycerol”, **Progress in Biomaterials**, Vol. 2, pp. 1-13.
27. Alwann, I.M. and Hassan, A., 2014, “Pyrolysis, Kinetic Model Study of Epoxidized Natural Rubber”, **Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology**, Vol. 30, pp 153-168.



ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล

(ภาษาอังกฤษ) Kantima Chaochanchaikul

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง

เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทรศัพท์ 02 836 3000

E-mail : kantima.c@rmutp.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

วท.บ.(วัสดุศาสตร์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วศ.ม. (เทคโนโลยีวัสดุ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปร.ด. (เทคโนโลยีวัสดุ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Polymer Composites

Wood/Natural Fiber Plastic Composites

Polymer Degradation

6. ประสบการณ์งานวิจัย

1. Hachana, N., Wongwanchai, T., Chaochanchaikul, K. and Harnnarongchai, W., 2017, "Influence of Crosslinking Agent and Chain Extender on Properties of Gamma-Irradiated PLA", **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 25, pp. 323-333.
2. Tomyangkul, S., Pongmuksuwan, P., Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul K., 2016, "Enhancing Sound Absorption Properties of Open-cell Natural Rubber Foams with Treated Bagasse and Oil Palm Fibers", **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Vol. 35, pp. 672-681.
3. Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul, K., 2015, "Effect of Blowing Agent on Cell Morphology and Acoustic Absorption of Natural Rubber Foam", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 25-29.
4. Chaochanchaikul, K. and Harnnarongchai, W., 2015 "Influence of Multifunctional Monomers on Gamma Irradiated Polylactic Acid", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 59-62.
5. Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2013, "Photodegradation and UV Penetration Profiles of PVC Compound and Wood/PVC Composites under UV Weathering", **Express Polymer Letters**, Vol. 7, No. 2, pp. 146-160.
6. Chaochanchaikul, K., Jayaraman, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2012, "Influence of Lignin Content on Photodegradation in Wood/HDPE Composites under UV Weathering", **BioResources**, Vol. 7, No. 1, pp. 38-55.
7. Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2011, "Structural and Thermal Stabilizations of PVC and Wood/PVC Composites by Metal Sterates and Organotin", **BioResources**, Vol. 6, No. 3, pp. 3115-3131.
8. Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2011, "Stabilizations of Molecular Structures and Mechanical Properties of PVC and Wood/PVC Composites by Tinuvin and TiO₂ Stabilizers", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 51, No. 6, pp. 1354-1365.
9. Pattamasattayasanti, N., Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2010, "Effects of UV-Weathering Aging and CeO₂ Based Coating Layer on Mechanical and Structural Changes in Wood/PVC Composites", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 17, No. 1, pp. 9-16.

10. Pulngern, T., Choocheepsakul, S., Padyenchuan, C., Rosarpitak, V., Prapruit, W., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2010, "Effects of Cross-section Design and Loading Direction on Creep and Fatigue Properties of Wood/PVC Composite Beams", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 16, No. 1, pp. 42-49.
11. Sombatsompop, N., Prapruit, W., Chaochanchaikul, K., Pulngern, T. and Rosarpitak, V., 2010, "Effect of Cross-section Design and Testing Conditions on Flexural Properties of Wood/PVC Composite Beams", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 16, No. 1, pp. 33-41.
12. Chaochanchaikul, K., Kositchaiyong, A., and Sombatsompop, N., 2009, "Blending Techniques Affecting Mechanical and Morphological Properties of Fly Ash/LDPE and CaCO₃/LDPE Composites", **Polymers & Polymer Composites**, Vol. 17, No. 5, pp. 281-290.
13. Sombatsompop, N., Taptim, K., Chaochanchaikul, K., Thongpin, C. and Rosarpitak, V., 2008, "Improvement of Structural and Thermal Stabilities of PVC and Wood/PVC Composites by Pb and Zn Stearates, and Zeolite", **Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry**, Vol. 45, No. 7, pp. 534-541.
14. Tungjitpornkull, S., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2007, "Mechanical Characterization of E-Chopped Strand Glass Fiber Reinforced Wood/PVC Composites", **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, Vol. 20, No. 6, pp. 535-550.
15. Chotirat, L., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2007, "On Adhesion Mechanisms and Interfacial Strength in ABS/Wood Sawdust Composites", **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Vol. 27, No. 8, pp. 669-678.
16. Sombatsompop, N., Uawongsuwan, P. and Chaochanchaikul, K., 2007, "Effect of Molecular Structure on Extrudate Swell Behavior for Different Thermoplastic Melts in an Electro-magnetized Die", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 47, No. 3, pp. 270-280.
17. Prachayawarakorn, J., Kumsri, J., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2006, "Effects of Compatibilizer Type and Rubber-Wood Sawdust Content on the Mechanical, Morphological and Thermal Properties of PVC/LDPE Blend", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol.102, No. 1, pp. 598-606.
18. Sombatsompop, N. and Chaochanchaikul, K., 2005, "Average Mixing Torque, Tensile and Impact Properties and Thermal Stability of PVC/Sawdust Composites with

Different Silane Coupling Agents”, **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 96, No. 1, pp. 213-221.

19. Sombatsompop, N. and Chaochanchaikul, K., 2004, “Effect of Moisture Content on Mechanical Properties, Thermal and Structural Stability, and Extrudate Texture of PVC/Wood Sawdust Composites”, **Polymer International**, Vol. 53, No. 9, pp. 1210-1218.
20. Sombatsompop, N., Chaochanchaikul, K., Phromchirasuk, C. and Thongsang, S., 2003, “Effect of Wood Sawdust Content on Rheological and Structural Changes, and Thermo-Mechanical Properties of PVC/Sawdust Composites”, **Polymer International**, Vol. 52, No. 12, pp. 1847-1855.

