

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ในปัจจุบันพลาสติกที่ผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์จากปิโตรเคมี ได้เข้ามามีบทบาทต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก และปริมาณการใช้พลาสติกเหล่านี้เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี พลาสติกที่ใช้กันโดยทั่วไปมักจะเป็นพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ จึงก่อให้เกิดขยะพลาสติกมากมายและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก มีหลายวิธีที่จะลดขยะพลาสติกโดยการนำพลาสติกเหล่านี้มาใช้ซ้ำ (reuse) หรือนำขยะพลาสติกหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (recycle) ซึ่งวิธีการเหล่านี้สามารถลดปริมาณขยะพลาสติกได้บางส่วน และเป็นทางเลือกที่ปลอดภัยที่สุด ดังนั้นการใช้พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ เช่น Poly(lactic acid) (PLA), Poly(vinyl alcohol) (PVA), Poly(hydroxyalkanoates) (PHAs), Poly(hydroxy butyrate) (PHB), Poly(hydroxybutyrate-co-b-Hydroxy valerate) (PHBV), Poly(glycolic acid) (PGA), Poly(ϵ -caprolactone) (PCL), Poly(butylene succinate) (PBS) เป็นต้น สามารถช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกได้

โปรตีนจากธัญพืช เช่น โปรตีนจากข้าวสาลี (wheat gluten, WG) โปรตีนจากถั่วเหลือง (soy protein) และโปรตีนจากข้าวโพด (corn protein) เป็นต้น เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วไม่หมดไปอีกทั้งยังสามารถย่อยสลายทางธรรมชาติถือว่าเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งที่นอกเหนือจากจะนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านอาหารแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตพลาสติกได้อีกด้วย wheat gluten เป็นโปรตีนได้รับความสนใจในการนำมาผลิตพลาสติก เนื่องจาก wheat gluten มีราคาถูกและเป็นวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ นอกจากนี้ wheat gluten มีสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากโปรตีนที่ได้จากธัญพืชชนิดอื่น กล่าวคือ wheat gluten มีสมบัติร่วมกันของความหนืดและความยืดหยุ่น (visco-elastic properties) อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ผลิตจาก wheat gluten มีความเปราะ และสามารถที่จะดูดซึมน้ำและความชื้นได้ภายหลังจากกระบวนการขึ้นรูปแล้ว มีหลายวิธีการที่จะแก้ปัญหาความเปราะ และการดูดซึมน้ำของพลาสติกที่เตรียมจาก wheat gluten การเติมพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) เช่น กลีเซอรอล (glycerol) [1,2] ซอร์บิทอล (sorbitol) [3] ไดและไตรเอทานอลามีน (di and triethanolamine) [4] และ กรดไขมันอิ่มตัว [5] เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถเพิ่มความเหนียว และความยืดหยุ่นของพลาสติกที่เตรียมจาก wheat gluten ได้ อย่างไรก็ตามการเติมพลาสติกไซเซอร์จะลดความแข็งแรงของพลาสติกอย่างมาก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงความเหนียวของ wheat gluten โดยใช้ยางธรรมชาติซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยและเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายภายในประเทศมาผสมกับ wheat gluten เพื่อเตรียมเป็นพลาสติกชีวภาพผสม เนื่องจากยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นที่ดี และสามารถรับแรงกระแทกได้ดี ดังนั้นการผสมยางธรรมชาติลงไปใน wheat gluten น่าจะช่วยปรับปรุงความเหนียวของพลาสติกที่เตรียมจาก wheat gluten นอกจากนี้การเติมยางธรรมชาติลงใน wheat gluten จะช่วยให้พลาสติกที่เตรียมได้มี การดูดซึมน้ำที่ลดลง เนื่องจากสายโซ่ของยางธรรมชาติประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีสมบัติต้านทานการดูดซึมน้ำ การปรับปรุงความเหนียวและสมบัติการต้านทานการดูดซึมน้ำของพลาสติกจาก wheat gluten จะทำให้พลาสติกชนิดนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางมากขึ้นในอนาคต อย่างไรก็ตาม wheat gluten และยางมีความเป็นขั้วที่ต่างกันโดย wheat gluten เป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ในขณะที่ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ดังนั้นการปรับปรุงความเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ทั้งสองจึงเป็นสิ่งจำเป็น การกราฟท์ (graft) มาลิกแอนไฮโดรไดโนพอลิเมอร์เป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง และมีประสิทธิภาพในปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรไดโนสายโซ่ของยางธรรมชาติ เพื่อเพิ่มความ

เป็นข้าวของยางธรรมชาติ ซึ่งทำให้ให้ยางที่ถูกตัดแปรด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์สามารถเข้ากันได้ดีกับ wheat gluten นอกจากนี้ มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ถูกกราฟท์บนยางสามารถทำปฏิกิริยากับ side chain ของกรดอะมิโนในโปรตีน เช่น ไลซีน (lysine) ซีรีน (serine) ทรีโอนีน (threonine) ซีสตีอีน (cysteine) และอาร์จินีน (arginine) [6] ดังนั้นมาลิกแอนไฮไดรด์จึงทำหน้าที่เป็นสารคู่ควบ (coupling agent) ที่ทำให้ wheat gluten และยางธรรมชาติเข้ากันได้

ดังนั้นการปรับปรุงความเหนียวและสมบัติการต้านทานน้ำของพลาสติกจาก wheat gluten จะทำให้พลาสติกชนิดนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น เช่น ของเล่น กระจกต้นไม้ กล่องพลาสติกใส่ CD และ DVD (CD and DVD case) หรือ ทำเป็นฟิล์ม เป็นต้น ซึ่งเป็นทางเลือกในการใช้พลาสติกที่ได้จาก wheat gluten แทนการใช้พลาสติกสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากสารปิโตรเคมี เช่น พอลิสไตรีนชนิดทนกระแทก (High impact polystyrene, HIPS) พอลิเอทิลีน และ พอลิโพรพิลีน เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเตรียมพลาสติกชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมของ wheat gluten และยางธรรมชาติ เพื่อเป็นพอลิเมอร์ทางเลือกในการลดการใช้พลาสติกสังเคราะห์ เช่น พอลิสไตรีนชนิดทนกระแทก (High impact polystyrene, HIPS) พอลิเอทิลีน และ พอลิโพรพิลีน เป็นต้น

1.2.2 เพื่อปรับปรุงสมบัติของพลาสติกที่เตรียมจาก wheat gluten ให้มีความเหนียว และสามารถต้านทานการดูดซึมน้ำให้สูงขึ้น โดยการผสมยางธรรมชาติที่ถูกตัดแปรด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของปริมาณยางธรรมชาติที่ถูกตัดแปรด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ที่ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการทนต่อแรงกระแทก และการต้านทานต่อการดูดซึมน้ำของพลาสติกที่เตรียมจาก wheat gluten

1.3 แนวคิดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการผสมกอลลูเตนจากข้าวสาลีด้วยยางธรรมชาติที่ถูกตัดแปรด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (NRMA) เพื่อปรับหมู่ฟังก์ชันของยางให้มีความเข้ากันได้กับกอลลูเตนมากขึ้น เนื่องจากกอลลูเตนเมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปจะมีสมบัติที่แข็งและเปราะ การผสมกอลลูเตนกับยางธรรมชาติที่ถูกตัดแปรด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ซึ่งมีสมบัติที่เหนียว จะช่วยปรับปรุงความเหนียวของกอลลูเตนจากข้าวสาลีให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถนำกอลลูเตนไปใช้ประโยชน์ในงานอื่นๆ ได้มากขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 พลาสติกที่เตรียมได้ในงานวิจัยสามารถนำมาใช้ทดแทนพลาสติกสังเคราะห์ เช่น พอลิสไตรีนชนิดทนกระแทก (High impact polystyrene, HIPS) พอลิเอทิลีน และ พอลิโพรพิลีน เป็นต้น

1.4.2 ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติ

1.5 ขอบเขตของการวิจัยและข้อจำกัดของงานวิจัย

1.5.1 ยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยเป็นยางแท่งเกรด STR 5L

1.5.2 การตัดแปรยางธรรมชาติด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์จะถูกเตรียมในสภาวะหลอมเหลว (molten state) ใน internal mixer

1.5.3 ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้ผสมกับยางคือ 20 phr

1.5.4 อัตราส่วนของ wheat gluten ต่ออย่างธรรมชาติที่ถูกตัดแปรด้วยมาลิคิกแอนไฮไดรต์ เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมอยู่ในช่วง 100/0 ถึง 50/50

1.6 การทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Reviewed Literature)

1.6.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกลูเตนจากข้าวสาลี

ข้าวสาลีเป็นพืชล้มลุก ต้นสีเขียว มีการแตกกอแบบเดียวกับต้นข้าว รวงข้าวสาลีมีลักษณะเป็นแท่ง เมล็ดข้าวสาลีจะเรียงกันเป็นแถวอยู่บนก้านรวง เปลือกที่หุ้มเมล็ดข้าวสาลีนั้นอาจมีหางหรือไม่มีหางก็ได้ [7] เมล็ดข้าวสาลีจะมีแป้งเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 70% และมีแร่ธาตุอื่น ๆ อีกเป็นองค์ประกอบ 30% ต้นข้าวสาลีประกอบไปด้วยธาตุอาหารมากกว่า 100 ชนิด ซึ่งประกอบไปด้วยแร่ธาตุหลัก ๆ ที่ร่างกายต้องการทุกตัว [8]

ในแถบตะวันออกเฉียงเหนือจะเอาเมล็ดข้าวสาลีมาขัดเอาผิวออกก่อน แล้วจึงเอาเมล็ดข้าวสาลีนั้นไปต้มชุปโดยใส่ผักใส่น้ำลงไปด้วย ส่วนใหญ่แล้วมักจะเอาเมล็ดข้าวสาลีมาไม่ให้เป็นแป้งเสียก่อน แล้วจึงเอาแป้งสาลีไปปรุงอาหารต่อไป เช่น ทำขนมปัง ขนมเค้ก โดนัท เส้นบะหมี่ และมะกะโรนี เป็นต้น ก็ทำจากแป้งสาลีเหมือนกัน ซึ่งข้าวสาลี (wheat) เป็นธัญพืช (cereal grain) ส่วนที่นำมารับประทานคือเมล็ดข้าวสาลี (wheat kernel) ซึ่งประกอบด้วย [9]

1. เอนโดสเปิร์ม (endosperm) คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ที่เป็นสตาร์ช (starch) ซึ่งมีอะไมเลส (amylase) และ อะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นส่วนประกอบหลักอยู่รวมเป็นเม็ดแป้ง (starch granule) และโปรตีนสำคัญในข้าวสาลี คือ กลูเตน ซึ่งเป็นไกลโคโปรตีนเกิดจากการรวมตัวของโปรตีนกลูเตนิน (glutenin) และไกลอะดีน (gliadin) ในสัดส่วนเท่าๆกัน โดยจะสร้างพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond) ทำให้กลูเตนมีลักษณะเหนียวและยืดหยุ่น สามารถเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตขึ้นโดยยีสต์ (yeast) หรือผงฟูเอาไว้ได้ ทำให้รักษารูปร่างของผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ (bakery) เช่น เค้ก (cake) ขนมปัง (bread) ลิปิด (lipid) วิตามิน และแร่ธาตุ เป็นส่วนประกอบ

2. รำ (bran) เป็นชั้นเปลือกห่อหุ้มเมล็ดข้าวสาลีไว้ หลายชั้นเป็นชั้นของรำ (bran) ชั้นนอกสุดเป็นแกลบ (husk) ซึ่งเป็นเซลลูโลส (cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

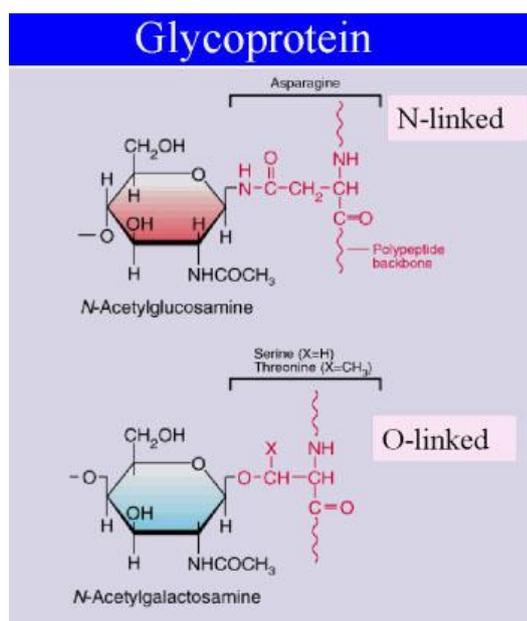
3. คัพภะ (wheat germ) เป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับต้นอ่อน (embryo) โดยรูปที่ 1-1 แสดงลักษณะของข้าวสาลีและส่วนประกอบของเมล็ดข้าวสาลี



รูปที่ 1-1 ลักษณะของข้าวสาลีและส่วนประกอบของเมล็ดข้าวสาลี [10,11,12]

แป้งสาลี (wheat flour) เป็นแป้ง (flour) ที่ได้จากเมล็ดของข้าวสาลี (wheat) โดยใช้ส่วนที่เป็นเอนโดสเปิร์มแล้วนำมาโม่ (milling) ให้เป็นผงละเอียด โปรตีนในแป้งสาลีทำให้แป้งสาลีมีสมบัติเฉพาะที่ต่างจากแป้งอื่น ซึ่งโปรตีนในแป้งสาลีประกอบด้วย โปรตีน กลูเตนิน (glutenin) และไกลอะดีน (gliadin) ในสัดส่วนเท่า ๆ กัน จะสร้างพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond) ทำให้กลูเตนมีลักษณะเหนียว และยืดหยุ่นสามารถเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสารที่ทำให้ขึ้นฟู (leavening agent) เช่น ยีสต์ (yeast) หรือผงฟู (baking powder) เอาไว้ได้ [13]

คาร์โบไฮเดรตและโปรตีนในโมเลกุลของไกลโคโปรตีนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยเกิดได้อยู่ 2 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 1-2

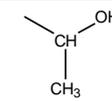
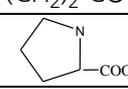
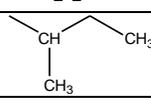
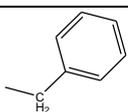
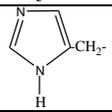


รูปที่ 1-2 การเชื่อมกันของคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนในโมเลกุลด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยการเกิดพันธะแบบ N-ไกลโคซิดิก และ O-ไกลโคซิดิก [14]

1. พันธะแบบ N-ไกลโคซิดิก (N-linked) โดยโมเลกุลของน้ำตาล (saccharide) จะสร้างพันธะ N-ไกลโคซิดิกแบบเบต้า กับ หมู่เอมีน (amine) ของแอสพาราจีน (asparagine) ที่อยู่ในลำดับกรดอะมิโน Asparagine-Amino acid-Serine หรือ Asparagine-Amino acid-Threonine โดยที่ Amino acid คือกรดอะมิโนใดๆ ก็ได้ยกเว้น โพรลีน (Proline) และแอสพาราจีน (Asparagine)
2. พันธะแบบ O-ไกลโคซิดิก (O-linked) โดยแซ็กคาไรด์จะสร้างพันธะ O-ไกลโคซิดิกแบบอัลฟา กับหมู่ไฮดรอกซิลของเซอรีน (serine) และทรีโอนีน (threonine)

กลูเตนเป็นไกลโคโปรตีนซึ่งพบในส่วนที่เป็นเอนโดสเปิร์มของธัญพืชบางชนิด เช่น ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ และข้าวโพด เกิดจากการรวมตัวของโปรตีนกลูเตนินและไกลอะดีนในสัดส่วนเท่าๆกัน โดยจะสร้างพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond) ทำให้กลูเตนมีลักษณะเหนียว ยืดหยุ่น และไม่ละลายน้ำ โดยกลูเตนประกอบไปด้วยกรดอะมิโนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 ชนิดและปริมาณของกรดอะมิโนในกลูเตนข้าวสาลี [15]

Amino Acid	μg	mol %	Side Chain
Cysteine	0.109	2.7%	$-\text{CH}_2-\text{SH}$
Asparagine/Aspartic Acid	0.102	3.3%	$-\text{CH}_2-\text{CONH}_2$ $-\text{CH}_2-\text{COOH}$
Threonine	0.072	2.7%	
Serine	0.127	5.5%	$-\text{CH}_2-\text{OH}$
Glutamine/ Glutamic Acid	1.195	35.3%	$-(\text{CH}_2)_2-\text{CONH}_2$ $-(\text{CH}_2)_2-\text{COOH}$
Proline	0.343	13.3%	
Glycine	0.096	6.4%	$-\text{H}$
Alanine	0.073	3.9%	$-\text{CH}_3$
Valine	0.124	4.7%	$-\text{CH}(\text{CH}_3)_2$
Methionine	0.075	2.2%	$-(\text{CH}_2)_2-\text{S}-\text{CH}_3$
Isoleucine	0.115	3.8%	
Leucine	0.207	6.9%	$-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)_2$
Phenylalanine	0.145	3.7%	
Histidine	0.066	1.8%	
Lysine	0.051	1.5%	$-(\text{CH}_2)_4-\text{NH}_2$
Arginine	0.094	2.3%	$-(\text{CH}_2)_3-\text{NH}-\text{C}(\text{NH}_2)_2$

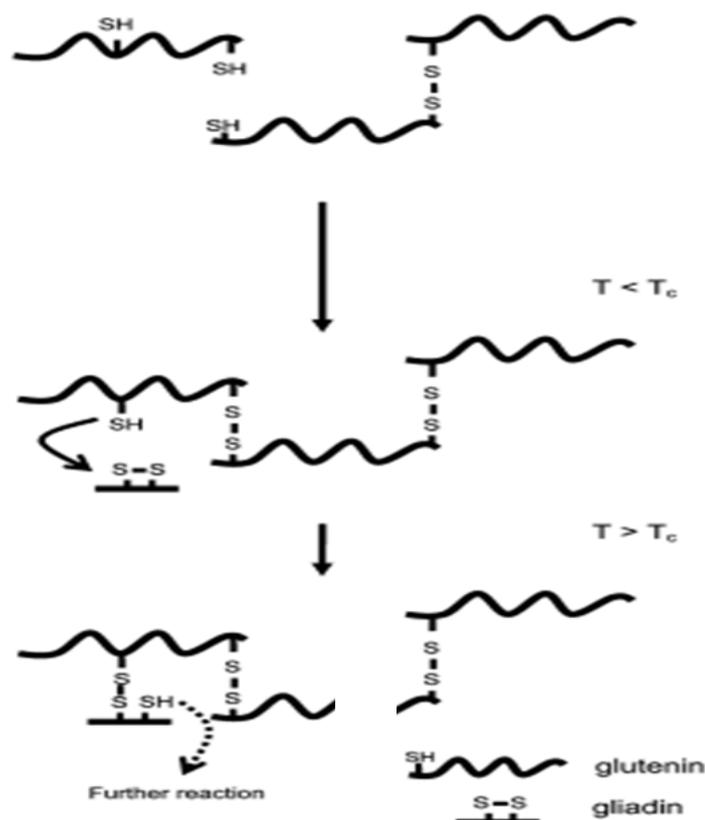
กลูเตนมีลักษณะเหนียว และเป็นโปรตีนที่มีสมบัติแบบ visco-elastic สามารถเตรียมได้โดยการแยกแ่งออกจากแป้งข้าวสาลี ซึ่งสมบัติที่สำคัญของกลูเตนคือ ไม่สามารถละลายน้ำได้ มีสมบัติการยึดติด และมีสมบัติการฟอร์มตัวเป็นฟิล์มได้ดี ดังนั้นจึงได้นำกลูเตนของข้าวสาลีมาใช้ในงานเคลือบหรือเป็นแผ่นฟิล์ม ติดสำหรับการใช้ในงานเคลือบและฟิล์มนั้น สามารถนำฟิล์มกลูเตนมาใช้กับอาหารได้ อย่างเช่น การเคลือบนำมาใช้ในการ packaging ในภาคอุตสาหกรรม เพื่อที่จะปรับสมบัติการป้องกันการแพร่ผ่าน (barrier properties) (สำหรับแก๊ส กลิ่น และอากาศ) หรือสามารถใช้งานบรรจุหีบห่อของกระดาษแข็ง โดยพบว่าโปรตีนมีการป้องกันการผ่านของออกซิเจนที่ดีกว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์ ดังนั้นกลูเตนจึงสามารถนำมาทดแทน

วัสดุสังเคราะห์อย่างเช่น พอลิเอทิลีน (PE) และแว็กซ์ (wax) ได้และผลิตภัณฑ์ที่ผลิตด้วยการใช้วิธีการฉีดขึ้นรูป

ข้อบกพร่องอันหนึ่งที่สำคัญของโปรตีนและพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ชนิดอื่นๆ คือเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือไอน้ำ จะส่งผลกระทบต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากโปรตีนรวมถึง กลูเตนจากข้าวสาลีด้วย พบว่าความแข็งแรงของฟิล์มลดลงเมื่อความชื้นที่เพิ่มขึ้นและการขยายออก (การยืดออก) นั้นก็เพิ่มขึ้น เพื่อที่จะลดความว่องไวต่อน้ำของผลิตภัณฑ์ที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก จะทำโดยให้เกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) และจากการปรับปรุงทำให้เกิดการเชื่อมขวาง นั้นจะทำให้ช่วยลดการบวมตัวลงประมาณ 10% เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการบวมตัวของพอลิเมอร์สังเคราะห์ (เช่น acrylates; polyurethanes)

wheat gluten เป็นโปรตีนเชิงซ้อน (complex protein) ทั้งไกลอะดินและกลูเตนินมีพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond, -S-S-) อยู่ในโครงสร้างเหมือนกัน ที่เกิดจากการรวมตัวของโปรตีนย่อย (protein fraction) 2 ชนิด คือ ไกลอะดิน (gliadin) และกลูเตนิน (glutenin) โดยพันธะไดซัลไฟด์มีอยู่ด้วยกันสองประเภท คือ พันธะไดซัลไฟด์แบบเชื่อมกันภายในโมเลกุล (intramolecular disulfide bond) และพันธะไดซัลไฟด์แบบเชื่อมกันภายนอกระหว่างโมเลกุล (intermolecular disulfide bond) ไกลอะดินจะมีพันธะไดซัลไฟด์แบบเชื่อมกันภายในโมเลกุลอยู่จำนวนมาก ส่วนกลูเตนินมีพันธะไดซัลไฟด์แบบเชื่อมกันภายนอกระหว่างโมเลกุลมากกว่าแบบแรก ซึ่งมีผลทำให้ไกลอะดินมีสมบัติหนืด (viscosity) และสามารถยืดออกได้ (extensibility) ดีกว่า ในขณะที่กลูเตนินมีความยืดหยุ่น (elasticity) มากกว่า ดังนั้น wheat gluten จึงมีสมบัติร่วมกันของความหนืดและความยืดหยุ่น (visco-elastic properties) [6]

พันธะไดซัลไฟด์ (-S-S-) และหมู่ไทโธล (-SH) อิสระของกรดอะมิโนซีสเทอีน (cysteine) ในไกลอะดินและกลูเตนินมีบทบาทสำคัญในการเกิดการเชื่อมขวาง (crosslinking) ระหว่างไกลอะดิน และกลูเตนิน เมื่อมีการให้ความร้อนโดยเกิดผ่านปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างกันของหมู่ไทโธลและหมู่ไดซัลไฟด์ (SH/SS interchange reaction) ดังแสดงในรูปที่ 1-3 การเชื่อมขวางระหว่างไกลอะดินและกลูเตนินที่อุณหภูมิสูงนี้จะทำให้ wheat gluten มีลักษณะคล้ายพลาสติกแข็ง



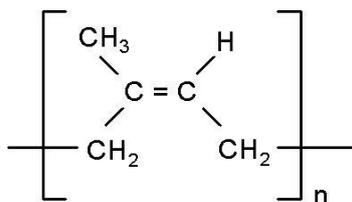
รูปที่ 1-3 การเชื่อมโยงของไกลอะดินและกลูเตนินโดย SH/SS interchange reaction (T_c คือ critical temperature) [16]

1.6.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ [17] จัดเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย ในปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติอันดับหนึ่งของโลก สามารถทำรายได้จำนวนมากให้แก่ประเทศและเกษตรกร โดยน้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่น และมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30% แขนวลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% เรียกว่าน้ำยางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็รีดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 °C เป็นเวลา 3 วัน เราก็จะได้ยางแผ่นรมควัน

นอกจากยางแผ่นรมควันแล้ว อุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางมีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควัน ผ่านการทดสอบและจัดระดับคุณภาพเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือยางแผ่นขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR 5L ซึ่งมีสีจางมาก จำเป็นต้องใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบ หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR 20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสีเงาปนสูงและมีสีเข้ม ก็อาจใช้ยางแผ่นหรือขี้ยางเป็นวัตถุดิบ เป็นต้น ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยากต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นราคายางแท่งจึงสูงกว่ายางแผ่นรมควัน

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis - 1,4 - polyisoprene มีสูตรโครงสร้างโมเลกุล ดังนี้



โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15,000 - 20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืดมันจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง

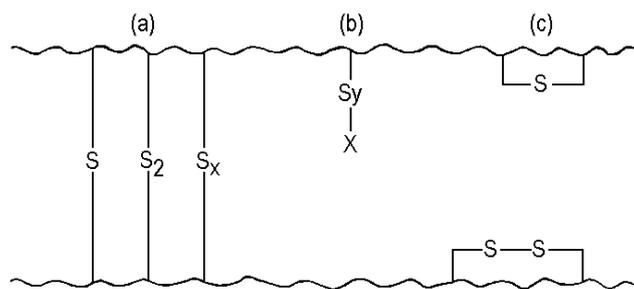
ลักษณะเด่นอีกอย่างของยางธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูงเมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับมันหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติดีเยี่ยมด้านการเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (assemble) ชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ยางดิบก็จะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ กล่าวคือยางจะอ่อนแ่ยมและเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น

ระบบคงรูปยางที่นิยมใช้แบ่งได้เป็น 3 ระบบใหญ่ๆ [20] ได้แก่

1. ระบบที่ใช้กำมะถัน

เป็นระบบที่ใช้กันมากในปัจจุบันเพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การคงรูปเกิดได้เร็ว และยางที่ได้ก็มีสมบัติที่ดี นิยมใช้ในการคงรูปยางที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล อีกทั้งยังเป็นข้อจำกัดอีกด้วย โดยกลไกในการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถันนั้นสามารถเกิดได้เองแต่ช้ามากจึงจำเป็นต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงและต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากจึงจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดี ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาสารเคมีชนิดต่างๆที่สามารถทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถันนั้นเกิดขึ้นได้เร็ว มีระดับการคงรูปที่สูง และมีสมบัติเชิงกลที่ดี ได้แก่ สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) และสารกระตุ้นปฏิกิริยา (activator) เป็นต้น โดยระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน การเชื่อมโยงอาจเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 1-4 โดยการเชื่อมโยงอาจเกิดได้หลายรูปแบบประกอบด้วย (a) พันธะมอนอซัลฟิดิก (monosulfidic) ไดซัลฟิดิก (disulfidic) หรือพอลิซัลฟิดิก (polysulfidic) (b) สายโซ่กำมะถัน และ (c) โครงสร้างแบบวง



รูปที่ 1-4 โครงสร้างการเชื่อมโยงแบบต่างๆ

ซึ่งในระบบที่มีปริมาณกำมะถันสูงหรือในระบบที่มีอัตราส่วนของปริมาณกำมะถันต่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาสูง การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นแบบพอลิซัลไฟดิก ยางคงรูปที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูง มีสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงพลวัต รวมถึงต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) ที่ดีเรียกว่าระบบการคงรูปนี้ว่าระบบคงรูปแบบดั้งเดิม (conventional vulcanization) หรือใช้ชื่อย่อว่า CV

แต่ในระบบที่มีปริมาณกำมะถันอยู่น้อยมากๆหรือมีอัตราส่วนของกำมะถันต่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำ หรือใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถให้กำมะถันออกมาในระหว่างกระบวนการคงรูป (sulfur donor accelerator) ซึ่งในระบบนี้การเชื่อมโยงส่วนใหญ่จะเป็นแบบมอนอซัลไฟดิก เรียกระบบการคงรูปนี้ว่าระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (efficient vulcanization) หรือใช้ชื่อย่อว่า EV

2. ระบบที่ใช้เพอร์ออกไซด์

การใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับระบบการคงรูปยางด้วยกำมะถันเพราะปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันและยางจะเกิดขึ้นได้ช้ามากแม้ที่อุณหภูมิสูงๆ โดยทั่วไปจึงต้องใช้ระยะเวลาในการคงรูปยาวนานเป็นชั่วโมงและต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงมาก อีกทั้งยางที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลต่ำ การเติมสารตัวเร่งลงไปในปริมาณเพียงเล็กน้อยจะช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างยางและกำมะถันเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น

แม้ว่าการออกสูตรเคมียางโดยทั่วไป จะใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่สารเคมีในกลุ่มนี้จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วและลักษณะการเชื่อมโยงของโมเลกุลยาง ดังนั้น สารตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติต่างๆของทั้งยางคอมพาวด์และยางคงรูป เช่น อัตราเร็วในการคงรูป เวลาสกอรัช ความทนทานต่อแรงดึง มอดูลัส การกระด้างตัว และความทนทานต่อความร้อน เป็นต้น

3. ระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีคือสารที่เติมลงไปใยางเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูป เพราะสารเคมีในกลุ่มนี้จะเข้าไปกระตุ้นสารตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น แม้ว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาจะค่อนข้างซับซ้อนและไม่เป็นที่ทราบอย่างแน่ชัด แต่เชื่อกันว่าสารกระตุ้นปฏิกิริยาจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่เสถียร ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับกำมะถันที่มีอยู่ในยางอย่างรวดเร็ว ทำให้ยางมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปสูงขึ้น

หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (rubber compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่าวัลคาไนเซชัน (vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เราเรียกว่า "ยางสุกหรือยางคงรูป" (vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยยางธรรมชาติจะถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เนื่องจาก

- ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง (tensile strength) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรง และมีความยืดหยุ่นสูงมากจึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ลูกมียาง ลูกยางอนามัย ยางรัดของ เป็นต้น
- ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (elasticity) สูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (heat build-up) ที่เกิดขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดกัน (tack) ที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) สูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง กระบวนการผลิตจะต้องดึงขึ้นงานออก จากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง

1.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พลาสติกจาก wheat gluten ค่อนข้างเปราะ จึงทำให้การนำไปใช้ของพลาสติกที่เตรียมจาก wheat gluten มีข้อจำกัด ดังนั้นการผสมยางธรรมชาติซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงลงใน wheat gluten ในปริมาณที่เหมาะสมน่าจะช่วยปรับปรุงความเหนียวของพลาสติก และทำให้มีค่าการดึงยึดได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม wheat gluten เป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ ในขณะที่ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ ดังนั้นการปรับปรุงความเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ทั้งสองจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น การกราฟท์ (graft) มาลิกแอนไฮโดรดีในพอลิเมอร์เป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง และมีประสิทธิภาพในปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ทำการกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรดีบนสายโซ่ของยางธรรมชาติ โดยปฏิกิริยาการกราฟท์จะเกิดขึ้นระหว่างพันธะคู่ที่อยู่ในยางธรรมชาติและมาลิกแอนไฮโดรดี โดยทั่วไปแล้วสารประกอบเปอร์ออกไซด์ เช่น ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide) จะถูกใช้เพื่อเป็น initiator ในปฏิกิริยาการกราฟท์ของพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามการใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เพื่อกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรดีในยางธรรมชาติ จะทำให้ยางเกิดการแตกสลายได้ง่าย [21] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้วิธี mechanochemistry มาใช้เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการกราฟท์ ซึ่งวิธีนี้จะทำโดยการผสมยางธรรมชาติและมาลิกแอนไฮโดรดีลงใน internal mixer ที่อุณหภูมิสูงภายใต้สภาวะที่มีแรงเฉือนที่อุณหภูมิสูงใน internal mixer ปฏิกิริยาการกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรดีบนสายโซ่ของยางธรรมชาติสามารถเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ มาลิกแอนไฮโดรดีที่ถูกกราฟท์บนยางสามารถทำปฏิกิริยากับ side chain ของกรดอะมิโนในโปรตีน เช่นไลซีน (lysine) ซีรีน (serine) ทรีโอนีน (threonine) ซีสตีอีน (cysteine) และอาร์จินีน (arginine) [6] ดังนั้นมาลิกแอนไฮโดรดีจึงทำหน้าที่เป็นสารคู่ควบ (coupling agent) ที่ทำให้ wheat gluten และยางธรรมชาติเข้ากันได้

งานวิจัยที่ได้รายงานถึงการใช้วิธี mechanochemistry เพื่อกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรดีในยางธรรมชาติ เช่น C. Nakason และคณะ [22] ได้ศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว สมบัติทางความร้อน และสัญญาณของพอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติที่ถูกตัดแปรด้วยมาลิกแอนไฮโดรดีกับพอลิเมทิลเมทาคริลิต การเตรียมยางธรรมชาติที่ถูกตัดแปรด้วยมาลิกแอนไฮโดรดีทำได้โดยนำยางธรรมชาติชนิดแผ่นมา masticate ใน internal mixer ที่อุณหภูมิ 135 °C ด้วยความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นจะเติมมาลิกแอนไฮโดรดีลงไปและทำการผสมต่อเป็นเวลา 8 นาที โดยจะเปลี่ยนแปลงปริมาณของมาลิกแอนไฮโดรดีที่เติมลงไป คือ 4 6 8 10 และ 12 phr ยางที่ถูกตัดแปรด้วยมาลิกแอนไฮโดรดีจะถูก

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR และพบว่า peak ของ C=O symmetric และ asymmetric stretching vibration ของหมู่แอนไฮไดรด์ที่ 1784 และ 1854 cm^{-1} ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีมาลิกแอนไฮไดรด์ถูกกราฟท์บนสายโซ่ของยาง ปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์ในยางธรรมชาติหาได้โดยใช้ IR spectroscopy เพื่อหาอัตราส่วน absorbance ของ C=O peak ของหมู่แอนไฮไดรด์ กับ peak ของ -C-H stretch บนพันธะ cis C=C บน cis-1,4-polyisoprene นอกจากนี้ ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ที่ถูกกราฟท์ในยางจะถูกหาด้วย acid-base titration โดยการนำยางที่ถูกตัดแปรมารีฟลักซ์ในโทลูอีน หลังจากนั้นนำ filtrate มาตกตะกอนยางที่ถูกตัดแปรด้วยอะซิโตน ต่อมานำยางที่ตกตะกอนมาละลายด้วยโทลูอีนอีกครั้ง และเติมน้ำลงไปในการละลายยางเพื่อไฮโดรไลซ์หมู่แอนไฮไดรด์ให้เป็นหมู่ของกรดคาร์บอกซิลิก ต่อมายทำการไตเตรตสารละลายดังกล่าวด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และทำการคำนวณหาปริมาณแอนไฮไดรด์

Z. Zeng, และคณะ [21] ได้เตรียมวัสดุเชิงประกอบของยางธรรมชาติและเส้นใยสำลี โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์เป็นสารคู่ควบ (coupling agent) เพื่อให้ยางและเส้นใยมีความเข้ากัน ยางที่ถูกตัดแปรด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์จะถูกเตรียมขึ้นก่อนที่จะไปผสมกับเส้นใยในเครื่อง two-roll mill การตัดแปรยางจะทำใน internal mixer ในสภาวะหลอมเหลว (molten state) โดยนำยางมาผสมกับมาลิกแอนไฮไดรด์ที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 8 นาที โดยจะเปลี่ยนแปลงปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์ที่เติมลงไป คือ 5 10 15 และ 20 phr ปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์หาได้โดยวิธี acid-base titration จากการทดลองพบว่า ปริมาณของแอนไฮไดรด์ในยางที่ถูกตัดแปรจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมมาลิกแอนไฮไดรด์ที่เติมลงไป และวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณแอนไฮไดรด์ในยางถูกตัดแปรมากที่สุด จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และจากการศึกษาสัญญาณของวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) พบว่าการตัดแปรยางด้วยสารคู่ควบมาลิกแอนไฮไดรด์จะเพิ่ม interfacial adhesion ระหว่างเส้นใยและยาง

ในส่วนพอลิเมอร์ผสมที่มี wheat gluten เป็นองค์ประกอบนั้น พบว่าได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์ผสมของ wheat gluten กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ดังนี้

J. John และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาถึงสมบัติทางกล สมบัติทางกลเชิงพลวัต การดูดซึมน้ำและน้ำมัน และการสลายตัวทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิคาร์โพลเลคโตน (PCL) ที่ทำการปรับปรุงแล้วด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (MA) กับกลูเตน โดยการทดลองจะกำหนดให้ปริมาณของกลูเตนที่จะผสมมีค่าอยู่ที่ 65% และ 75% โดยน้ำหนัก และปรับปรุง PCL ได้โดยการกราฟท์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณ 2.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งแอนไฮไดรด์จะทำหน้าที่เป็นตัวประสาน กระบวนการผสมจะทำในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ที่มีลักษณะของเกลียวหมุนไปทางเดียวกัน พอลิเมอร์ผสมที่ได้จะนำไปขึ้นรูปโดยการฉีด การทดสอบสมบัติด้านการดึง การยืดหยุ่น การดูดซึมน้ำ และโครงสร้างเฟส โดยทดสอบด้วยเทคนิคไมโครสเปกโทรสโคปี เทคนิค DMA และทำการทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จากการศึกษาพบว่าการเติมพอลิคาร์โพลเลคโตนที่กราฟท์ด้วยมาลิก (PCL-MA) ลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PCL กับกลูเตน จะช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสม เช่น ค่า tensile strength และค่ามอดูลัส แต่ค่า elongation ลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม PCL กับ กลูเตน ที่ไม่มีแอนไฮไดรด์ และ PCL เพียงอย่างเดียว จากการทดสอบ DMA ของพอลิเมอร์ผสม พบว่าการเติม PCL-MA ลงไปทำให้ค่ามอดูลัส ค่า T_m และค่า T_g เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเติม MA ลงไปในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิคาร์โพลเลคโตน (PCL) กับกลูเตนจะทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้จริง ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจน

ในงานวิจัย V.L. Finkenstadt และคณะ [24] ได้ทำการผสม wheat gluten (WG) ลงใน polycaprolactone (PCL) เพื่อทำเป็น biodegradable polymer โดยทำการผสมกันใน twin- screw

extruder โดยเมื่อมีปริมาณ WG เพิ่มขึ้น อุณหภูมิในกระบอกหลอมก็จะต้องมีการปรับให้สูงขึ้น และเวลาในการหล่อเย็นก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีเวลาในการหล่อเย็น 35-45 วินาที จากนั้นฉีดขึ้นรูปด้วย injection molding ความดันในการฉีดสูงสุด 14,000 psi และแม่พิมพ์มีอุณหภูมิ 45°C นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบ โดยจากภาพ SEM แสดงให้เห็นว่าอนุภาคที่อยู่ในเมทริกซ์มีการกระจายตัวที่ดี เมื่อนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติการดึงยืด พบว่า tensile strength ของพอลิเมอร์จะมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณ WG เพิ่มขึ้นจาก 20 MPa (0% WG) ไปเป็น 6 MPa (50% WG) อย่างไรก็ตาม การลดลงของค่า tensile strength จะแสดงถึงการยืดเกาะกันระหว่าง WG และ PCL ซึ่งไม่สามารถคำนวณจาก Nicolais-Narkis model ได้ แต่จะส่งผลต่อค่า elongation ที่สูงๆ (>900%) ใน PCL-WG composites ตั้งแต่ 20% WG ขึ้นไป โดยที่ 35% WG ค่า elongation จะลดลงเป็น 400% และที่ 40-50 %WG จะมีค่า elongation น้อยกว่า 100% นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคคิดเป็น 0.3 ของปริมาตรทั้งหมดซึ่งก็คือ 30 %WG โดยน้ำหนักเทียบกับ PCL

นอกจากนี้ A. A. Mohamed และคณะ [25] ยังได้ศึกษาวัสดุผสมโดยใช้ WG เป็นสารตัวเติมเพื่อลดต้นทุนและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยทำการผสมกับ PCL ซึ่งเป็น matric และ pMDI ที่เป็นสารเชื่อมประสาน โดยมีการใช้ PCL/gluten ในสัดส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ผสมใน internal mixer ที่ 120 °C เป็นเวลา 5 นาที ที่ความเร็วรอบ 10 rpm หลังจากนั้นจึงเติม MDI 2% และปรับความเร็วรอบเป็น 50 rpm เป็นเวลา 25 นาที และนำไปกดแล้วนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่น sheet ตัดเป็นรูปดัมเบลหรือบดแล้วนำไปทดสอบ โดยผลของ DSC แสดงค่า T_g ของสารแต่ละตัวซึ่งชี้ให้เห็นได้ชัดว่าเกิดอันตรกิริยากันระหว่าง PCL กับ สารตัวเติมเกิดขึ้น และ ΔH ของทั้ง endothermic (melting) และ exothermic (crystallization) ของ PCL นั้นมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ WG เพิ่มมากขึ้น โดยผลของการมีอยู่ของ pMDI จะแสดงความแข็งแรงเชิงกลโดยเกิดการทำอันตรกิริยากับ WG แต่เกิดไม่มากนักกับ PCL จากการวิเคราะห์ด้วย FT-IR นั้นแสดงให้เห็นว่าไม่มีการเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสารแต่ละตัวเกิดขึ้น แต่แสดงอันตรกิริยาเชิงกายภาพระหว่างกัน โดยการมีอยู่ของ pMDI ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอันตรกิริยาระหว่าง PCL กับ WG แต่เป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม

A. A. Mohamed และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาอันตรกิริยาระหว่าง poly(lactic acid) (PLA) และ wheat gluten โดยได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น DSC, TGA, FT-IR, X-ray diffraction และ phase contrast microscope ซึ่งอัตราส่วนของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมคือ 20, 50 และ 80% ใน wheat gluten โดยทำการผสมพอลิเมอร์ทั้งสองในเครื่องผสม Brabender ที่อุณหภูมิ 190 °C โดยเริ่มทำการ pre-heat ที่อุณหภูมิ 190 °C ก่อนแล้วจึงใส่เม็ด PLA ลงไปหลอมเป็นเวลา 2 นาทีที่ความเร็วรอบ 10 rpm จากนั้นใส่ wheat gluten ที่มีความชื้นประมาณ 8% ลงไปผสม ปรับความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเป็น 50 rpm แล้วผสมเป็นเวลานาน 15 นาที แล้วจึงทำให้เป็นผงละเอียดที่อุณหภูมิเยือกแข็ง ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วย DSC พบว่า wheat gluten แสดงพีคของอุณหภูมิ T_g ที่ 63 °C และ PLA บริสุทธิ์แสดงพีคอุณหภูมิ T_g ที่ช่วงอุณหภูมิเดียวกัน ที่อัตราส่วนของ PLA แตกต่างกันในพอลิเมอร์ผสม (20:80, 50:50, 80:20) จะพบพีคของ T_g ตามมาด้วยพีคของการเกิดผลึกของ PLA และพบพีคของการหลอมของ PLA ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามจากการทดสอบ DSC ของพอลิเมอร์ผสมพบว่า อุณหภูมิในการเกิดผลึกและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของ PLA รวมทั้ง T_g ในการทำ DSC รอบที่ 2 จะมีค่าลดลง การมี wheat gluten ในพอลิเมอร์ผสมจะลดความเป็นผลึกของ PLA ให้มีความเป็นอสัณฐานมากขึ้น ความเป็นผลึกที่ต่ำลงของ PLA แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง PLA กับ wheat gluten จากข้อมูลของการวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่า มีปริมาณ PLA 10% ที่สลายตัวไปที่อุณหภูมิ 316 °C ส่วน wheat gluten จะสลายตัวไป 10% ที่ 245 °C จากการวิเคราะห์ด้วย

Solid-state FT-IR พบว่าพีคของ amide group I และ II ลดลง ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีการสลายตัวทางความร้อนของ wheat gluten และ PLA ส่วนการวิเคราะห์ด้วย phase contrast microscope พบว่า PLA จะเริ่มหลอมที่อุณหภูมิ 150 °C โดย PLA จะถูกหลอมเป็นวัฏภาคต่อเนื่องในช่วงอุณหภูมิ 150-250 °C

S. W. Lim และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพระหว่าง wheat gluten และ aliphatic polyester ซึ่งได้ทำการทดลองโดยนำ wheat gluten มาอบที่อุณหภูมิ 80 °C แล้วนำไปผสมกับ plasticizer เช่น polyols จากนั้นผสมสารทั้งหมดที่ 90 °C เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นนำไปขึ้นรูปให้เป็นแผ่น แล้วนำไปตัดให้เป็นเม็ด โดย wheat gluten ที่มี plasticizer และ aliphatic polyester ถูกผสมบน Brabender counter-rotating twin screw extruder ซึ่งเม็ดคอมปาวด์ที่ได้จะถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์แบบ rectangular bars จะได้ฟิล์มที่มีองค์ประกอบพื้นฐานเป็น wheat gluten โดยทั่วไป aliphatic polyester นั้นมีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยมและสามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานแล้วทั้ง แต่ข้อด้อยของพอลิเมอร์ชนิดนี้ คือ มีราคาแพง ดังนั้น เพื่อเป็นการลดต้นทุน จึงได้ทำการผสม aliphatic polyester กับ wheat gluten ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีราคาถูกซึ่งย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้พบว่าพอลิเมอร์ผสมนี้มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนที่ดี

X. Zhang และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างเฟสของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง wheat gluten (WG) และ poly(vinyl alcohol) (PVOH) ด้วย high-resolution solid-state NMR โดยได้ทำการเตรียมตัวอย่างเป็นแผ่น sheet ที่ใช้ glycerol และน้ำเป็น plasticizer ใช้ acetic acid ปรับค่า pH ให้ได้ประมาณ 4 แล้วนำไปผสมในเครื่องผสมความเร็วสูงเป็นเวลา 1.5 นาทีด้วยความเร็วรอบ 3000 rpm แล้วทิ้งไว้ข้ามคืน จากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่องผสม Banbury ที่ 80 °C เป็นเวลา 5 นาทีด้วยความเร็วรอบ 100 rpm จากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปด้วยน้ำหนัก 200 kN ที่ 130 °C เป็นเวลา 5 นาที จากการทดลองพบว่าสายโซ่พอลิเมอร์ของ WG สามารถเคลื่อนไหวได้ดีเมื่อมีการใช้กลีเซอรอลและน้ำเป็น plasticizer ในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง WG และ PVOH มีอันตรกิริยาของพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลระหว่าง WG และ PVOH ซึ่งจะทำให้เกิดความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดบางส่วนในระดับนาโนโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณ PVOH ต่ำๆ ค่า tensile strength และ modulus ของพอลิเมอร์ผสมถูกปรับปรุงขึ้นเมื่อเทียบกับ WG เพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลค่อนข้างต่ำและไม่สามารถเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มองค์ประกอบของ PVOH ในพอลิเมอร์ผสม พอลิเมอร์ผสม WG/PVOH จะประกอบด้วยวัฏภาคที่เข้ากันได้ของ WG ที่ถูกพลาสติกไซซ์และ PVOH ร่วมกับวัฏภาคที่เข้ากันได้ของ WG และ PVOH การเพิ่มปริมาณ PVOH มากขึ้นในพอลิเมอร์ผสมจะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ของวัฏภาคที่เข้ากันได้และพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มที่จะมีความเข้ากันได้ ในขณะที่ความสามารถในการดึงยึดของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อปริมาณของ PVOH ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น

R. M. Dicharry และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง wheat gluten (WG) กับ thiolated poly(vinyl alcohol) (TPVA) ซึ่ง TPVA นี้ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้ปฏิกิริยา esterification ของ poly(vinyl alcohol) (PVA) กับ 3-mercaptopropionic acid ทำให้ได้ multifunctional macromolecular thiol โดยสามารถยืนยันหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นนี้ได้จากเทคนิค NMR และ IR จากนั้นนำ TPVA ที่ได้ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 2000, 9500, 50,000, และ 205,000 ไปผสมกับ WG ในสัดส่วนการผสม 5, 20, และ 40% โดยน้ำหนัก แล้วนำไปทำการอัดขึ้นรูป จากผลการทดลองพบว่าการใช้ TPVA ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 50,000 ผสมลงใน WG ที่สัดส่วน 20% จะทำให้มีพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPVA กับ WG มีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น กล่าวคือค่า fracture strength, elongation และ modulus เพิ่มขึ้น 76%,

80% และ 25% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ WG บริสุทธิ์ ซึ่งแตกต่างกับการเติมสารเติมแต่งของ WG ทั่วไป เช่น glycerol และ sorbitol ที่สามารถเพิ่มความยืดหยุ่นได้แต่ไม่สามารถเพิ่มมอดูลัส และความแข็งแรง

นอกจากการนำ wheat gluten มาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ผสม (polymer blend) ที่มีสมบัติที่ดีแล้ว ได้มีการวิจัยในการนำ wheat gluten มาใช้เป็นตัวเติม (filler) เพื่อเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบของยาง (rubber composite) L. Jong [29] ได้ทำการศึกษาการใช้ wheat gluten (WG) และ แป้งสาลี (WS) เป็นตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบของ carboxylated styrene-butadiene rubber โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ WG และ WS มาผสมกันในอัตราส่วนต่างๆเพื่อใช้เป็นตัวเติมร่วม (co-filler) และเติมลงในยางจากการทดลองพบว่าการเติมตัวเติมร่วมที่มีอัตราส่วนของ WS มากกว่า WG ในวัสดุเชิงประกอบจะเสริมแรงได้มากกว่าการเติมตัวเติมร่วมที่มีอัตราส่วนของ WG มากกว่า WS นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มี WS อยู่มาก จะมีความเสถียรต่อความล้า (fatigue) และมีสมบัติการคืนตัวที่ดีในช่วงที่มี strain ต่ำ แต่ที่ strain สูง ชิ้นงานจะแตกหักและไม่สามารถคืนรูปได้ ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่มี WG อยู่มาก จะไม่เสถียรต่อความล้า ในช่วงที่มี stain ต่ำ แต่ที่ strain สูง ชิ้นงานมีความสามารถในการคืนรูปที่ดี จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ค่า modulus และ elasticity ของวัสดุเชิงประกอบสามารถเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันได้โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวเติมร่วม WG และ WS

นอกจากนี้ S. C. Peterson คณะ [30,31] ยังได้ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของ carboxylated styrene-butadiene rubber โดยใช้ wheat gluten เป็นสารเสริมแรง โดยจะเติม wheat gluten ในปริมาณ 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก การเตรียมวัสดุเชิงประกอบทำโดยการผสม wheat gluten และ rubber latex ในน้ำ และทำการผสมที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วรอบสูง (400 rpm) เพื่อลดการเกาะรวมกันของอนุภาค wheat gluten ซึ่งพบว่าการกวนสารแขวนลอยของ wheat gluten ในน้ำที่ความเร็วรอบสูงจะช่วยลดขนาดอนุภาคของ wheat gluten และเวลาที่เหมาะสมในการกวนสารแขวนลอยของ wheat gluten คือ 16 นาที ซึ่งทำให้ขนาดอนุภาคลดลง 13 % และขนาดอนุภาคที่ได้คือ 4.5 μm หลังจากทำการผสม wheat gluten และ rubber latex จะนำของผสมมาทำให้แห้งด้วยเครื่อง freeze-dryer ต่อมาจะนำวัสดุเชิงประกอบที่แห้งแล้วมาอัดขึ้นรูปด้วยที่อุณหภูมิ 110 °C ความดัน 10,000 lb เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ชิ้นงานขนาด 25.4 mm x 50.8 mm x 3 mm ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วจะนำมาทดสอบเพื่อหาค่า tensile strength และทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต เพื่อหาค่า oscillatory storage (G') และ loss modulus (G'') โดยใช้เครื่อง rheometer จากการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณ wheat gluten อยู่ 40% มีความเปราะมาก ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณ wheat gluten อยู่ 10% มีค่า modulus, % elongation และ toughness เท่ากันหรือมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติม carbon black ซึ่งวัสดุเชิงประกอบนี้เป็นตัวอย่างควบคุม (control sample) สำหรับการศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัตในวัสดุเชิงประกอบที่มี filler ค่า G' เป็นค่าที่บ่งบอกถึง reinforcement strength ของ filler ถ้าค่า G' สูงจะบ่งบอกว่า filler นั้นมีความสามารถในการเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบ จากการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มี wheat gluten มีค่า G' ที่ 140 °C น้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มี carbon black แสดงว่า wheat gluten มีสมบัติในการเสริมแรงได้น้อยกว่า carbon black นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่า G' ของวัสดุเชิงประกอบที่มี wheat gluten ในงานวิจัยนี้กับค่า G' ของวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมแป้งสาลีจากงานวิจัยอื่น [32] พบว่า wheat gluten มีค่าความสามารถในการเสริมแรงต่ำกว่าแป้งสาลีถึง 10 เท่า

2. คำสำคัญของโครงการวิจัย

ภาษาไทย : กลูเตนจากข้าวสาลี, ยางธรรมชาติ, มาลิกแอนไฮไดรด์, พลาสติกชีวภาพ

ภาษาอังกฤษ : wheat gluten, natural rubber, maleic anhydride, bioplastic

3. คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

คำย่อ	คำอธิบายสัญลักษณ์
CV	conventional Vulcanization
DCP	dicumyl peroxide
MA	Maleic anhydride
NR	natural rubber, ยางธรรมชาติ
NRMA	ยางธรรมชาติที่ถูกกราฟท์ด้วย มาลิกแอนไฮไดรด์
WG	wheat gluten, กลูเตน

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

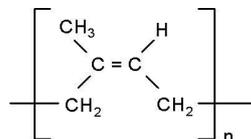
- 1) ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50, 100 และ 500 มิลลิลิตร
- 2) ขวดก้นกลมสองคอ (Two Neck Flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 3) ชุดรีฟลักซ์ (Reflux Unit)
- 4) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 5) บิวเรต (Burette) ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 6) ที่คีบ (Forceps)
- 7) กระบอกตวง (Cylindrical Flask) ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 8) เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) ขนาด 200 องศาเซลเซียส
- 9) จุกปิดขวด (Stopper)
- 10) หลอดหยด (Dropper)
- 11) แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Bar)
- 12) แท่งแก้วคนสาร (Stirring Rod)
- 13) แท่นให้ความร้อน (Hot Plate)

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ตู้อบ (hot air oven) บริษัท BINDER
- 2) เครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer) จากบริษัท CHAREON TUT Co., Ltd. รุ่น MX105-D40L50
- 3) เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) จากบริษัท Bruker Optics, Germany รุ่น VERTEX 70
- 4) เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ (Universal Tensile Testing Machine) รุ่น Instron-5969
- 5) เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Tester) รุ่น Pendulum Impact Tester B5102.204 J บริษัท Zwick I
- 6) เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) รุ่น Mettler Toledo DSC 1 จาก Switzerland
- 7) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น TM-3030 บริษัท Hitachi, Japan
- 8) เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวของสารด้วยความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) รุ่น TGA7HT บริษัท Perkin Elmer
- 9) เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression Molding Machine) จากบริษัท Labtech Engineering Co., Ltd. (Scientific)
- 10) เครื่องตัดชิ้นงานด้วยเลเซอร์ (Laser Engraving Cutting Machine) รุ่น 6040N
- 11) เครื่องเคลือบทอง (Sputter Coater)

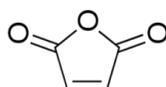
4.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

4.3.1 ยางธรรมชาติ STR 5L (NR), $T_g = -73\text{ }^{\circ}\text{C}$



4.3.2 กลูเตนจากแป้งข้าวสาลี (WG) จากบริษัท Zhangjiaganghengfeng Starch Products Co., Ltd.

4.3.3 มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) จากบริษัท Fluka Chemika

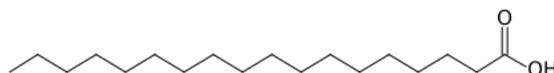


M.W. = 98.06 g/mol, Melting point = 52.8 $^{\circ}\text{C}$

4.3.4 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซีในกระบวนการผลิตยาง จากบริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด

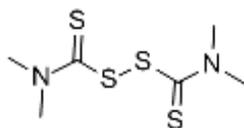
M.W. = 81.41 g/mol, Melting point = 1975 $^{\circ}\text{C}$

4.3.5 กรดสเตียริก (Stearic acid, SA) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซีในกระบวนการผลิตยาง จากบริษัท QREC (ASIA) SDN BHD



M.W. = 284.45 g/mol, Melting point = 69.6 $^{\circ}\text{C}$

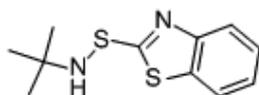
4.3.6 เตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide, TMTD) จากบริษัท Sinochem Liaoning



M.W. = 240.43 g/mol, Melting point = 157 $^{\circ}\text{C}$

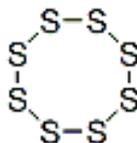
4.3.7 เบนโซไฮเอซิลซัลฟีนามิด (N-tert-Butyl-2-benzothiazolesulfenamide, TBBS) จาก

บริษัท ชันนี่เวลด์ เคมีเคิล จำกัด



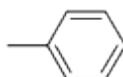
M.W. = 238.37 g/mol, Melting point = 105 °C

4.3.8 กำมะถัน (Sulphur, S) เป็นสารทำให้ยางคงรูป จากบริษัท Fluka Chemika



M.W. = 256.52 g/mol, Melting point = 114 °C

4.3.9 โทลูอีน (Toluene) จากบริษัท Reagent Chemical Industrial Ltd.



Boiling point = 110.6 °C

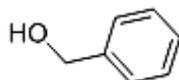
4.3.10 อะซีโตน (Acetone) จากบริษัท Reagent Chemical Industrial Ltd.



4.3.11 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) จากบริษัท Ajax Finechem Ltd.

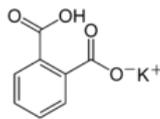
M.W. = 56.11 g/mol

4.3.12 เบนซิลแอลกอฮอล์ (Benzyl alcohol) จากบริษัท Scarlau



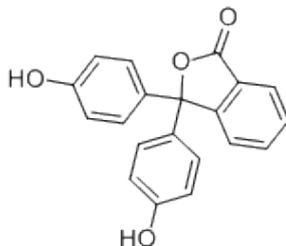
M.W. = 108.14 g/mol

4.3.13 โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (Potassium hydrogen phthalate) จากบริษัท Fluka Chemika



M.W. = 204.22 g/mol

4.3.14 ฟีนอพทาไลน์ (Phenophthalein) จากบริษัท Fluka Chemika



M.W. = 318.32 g/mol

4.3.15 เมทานอล (Methanol) จากบริษัท Scarlau

4.3.16 ไนโตรเจนเหลว (Nitrogen liquid)

4.3.17 น้ำกลั่น

4.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการผสมกอลลูเตนจากข้าวสาลีกับยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ (NRMA) เพื่อปรับหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติให้มีขั้ว และมีความเข้ากันได้กับกอลลูเตนมากขึ้น ซึ่งยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่มีความเหนียว จะช่วยปรับปรุงความเหนียวของกอลลูเตนจากข้าวสาลีให้มากขึ้นได้ โดยในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนในการดำเนินงาน ดังนี้

4.4.1 การเตรียมยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ (NRMA)

โดยทำการกราฟท์มาลิอิกแอนไฮไดรด์ลงบนยางธรรมชาติด้วยวิธีทางกลและเคมีร่วมกัน (mechanochemistry) ในเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) ซึ่งจะไม่มีการใช้ตัวทำละลาย โดยในขั้นตอนการกราฟท์นี้ จะใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 20 phr ในการกราฟท์ลงบนยางธรรมชาติ ซึ่งขั้นตอนมีดังนี้

1. นำยางธรรมชาติมาบดให้หยาบ (mastication) ในเครื่อง internal mixer ที่อุณหภูมิ 120 °C ด้วย rotor speed 60 rpm เป็นเวลา 20 นาที

2. การเตรียมยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ (NRMA) โดยจะทำการกราฟท์มาลิอิกแอนไฮไดรด์ลงบนยางธรรมชาติใน internal mixer โดยในงานวิจัยนี้จะทำการกราฟท์ยางธรรมชาติด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ ด้วยกันสองวิธีคือ

- การกราฟท์โดยไม่มีการใช้ initiator

ในขั้นตอนการกราฟท์นี้จะใช้ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ทั้งความเข้มข้น 20 phr ความเร็วรอบ 60 rpm ภายใต้อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที

- การกราฟท์โดยใช้ initiator

Initiator ที่ใช้ในการกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์คือ dicumyl peroxide ความเข้มข้น 1 phr และใช้ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ 20 phr ความเร็วรอบ 60 rpm ภายใต้อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 5 นาที

4.4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ NRMA และหาปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ (MA) ที่ถูกกราฟท์บนยาง

ยางที่จะนำมาพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย FT-IR และหาปริมาณ MA ด้วยเทคนิค titration ในยาง NRMA ที่ทำการกำจัด MA ที่มากเกินไปที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการกราฟท์บนสายโซ่ของยาง NR ออกไปก่อน โดยจะนำยาง NRMA มาละลายในโทลูอีนและทำการรีฟลักซ์ให้ความร้อนจนถึง 110 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ภายใต้ reflux condition ในโทลูอีนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองแยกสารที่ไม่ละลายออกไป กรองแยก MA ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาการกราฟท์ออกจากสารละลายในโทลูอีน หลังจากนั้นทำการตกตะกอนด้วย acetone โดยเติม acetone ลงไปมากเกินไป ทำการแยกตะกอนออกมาจากนั้นล้างตะกอนด้วย acetone แล้วนำตะกอนที่ได้ซึ่งก็คือ NRMA ที่ไม่มี MA ที่มากเกินไปไปอบในตู้อบสูญญากาศที่ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำ NRMA ไปละลายด้วยโทลูอีนอีกครั้งแล้วนำไปหยดบนแผ่น KBr อัดแผ่น จากนั้นนำแผ่น KBr ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 110 °C เพื่อนำไปทดสอบการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR ต่อไป

สำหรับการหาปริมาณ MA ที่ถูกกราฟท์บนยางทำโดยการไตเตรต โดยนำ NRMA 3 กรัม มาละลายในโทลูอีน 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นให้ความร้อนจนถึง 110 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ภายใต้ reflux condition ต่อมาทำการกรองแยกสารที่ไม่ละลายออกไป และเติม acetone ลงไปเกินพอ เพื่อทำการตกตะกอน ต่อมาทำการกรองแยกตะกอนออกมา และล้างตะกอนด้วย acetone แล้วนำตะกอนที่ได้ไปอบในตู้อบสูญญากาศ ที่ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตะกอนที่อบแล้ว 1 กรัม มาละลายในโทลูอีน 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ข้ามคืน ต่อมานำสารละลายที่ได้มาเติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร เพื่อ hydrolyze หมู่อ anhydride ให้เป็นหมู่อ carboxylic acid นำสารละลายที่ได้ไปทำการ reflux เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 110 °C ต่อมาทำการไตเตรตสารละลายนี้ด้วย 0.025 N potassium hydroxide ที่ละลายใน methanol/benzyl alcohol ในสัดส่วน 1/9 โดยปริมาตร โดยอินดิเคเตอร์ที่ใช้คือ phenolphthalein 1% ในเมทานอล แล้วนำความเข้มข้นของกรดที่ได้มาคำนวณ หาปริมาณของ MA ที่ถูกกราฟท์ จากสมการที่ 4-1

$$MA(\% \text{ wt}) = \frac{(V_1 - V_0)}{2W} \times N \times 98 \times 100 \quad (4-1)$$

เมื่อ N	คือ ความเข้มข้นของ potassium hydroxide ที่ละลายใน methanol/benzyl alcohol (โมล/ลิตร)
V ₁ และ V ₀	คือ ปริมาตรของ KOH ใช้ในการไตเตรตและการทดสอบ blank test (ลิตร)
W	คือ น้ำหนักของ NRMA (กรัม)

4.4.3 การผสม WG/NRMA และการเติมสารเคมีที่ใช้ในการเชื่อมขวางยาง

ทำการผสม WG/NRMA และเติมสารเคมีที่ใช้ในการเชื่อมขวางยางเพื่อทำให้เกิดการเชื่อมขวาง โดยจะแสดงสัดส่วนที่ต่างกันและสภาวะในการผสม ดังตารางที่ 4-1 และ 4-2

โดยนำกลูเตนจากข้าวสาลีและยางธรรมชาติที่ถูกตัดแปรด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์มาผสมในเครื่องบดระบบปิด (internal mixer) ที่อัตราส่วน 100/0 ถึง 50/50 และมีการทำให้ยางคงรูปโดยใช้ระบบกำมะถัน

(sulphur vulcanization system) ภายหลังจากที่เติมมาลิกแอนไฮไดรด์ลงไปแล้ว โดยมีสภาวะในการผสม ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-1 ปริมาณสารเคมีที่เติมในสูตรต่างๆ

สูตร	สารเคมีที่ใช้ในการบ่มยาง (กรัม)							
	NR	MA	WG	Zinc oxide	SA acid	TMTD	TBBS	Sulfur
WG/NRS 50:50	30	-	30	1.50	0.45	0.12	0.18	0.75
WG/NRS 60:40	24	-	36	0.36	0.11	0.03	0.04	0.18
WG/NRS 70:30	18	-	42	0.27	0.08	0.02	0.03	0.14
WG/NRS 80:20	12	-	48	0.18	0.05	0.01	0.02	0.09
WG/NRS 90:10	6	-	54	0.09	0.03	0.01	0.01	0.05
WG/NRMAS 50:50	30	6	30	1.50	0.45	0.12	0.18	0.75
WG/NRMAS 60:40	24	4.8	36	0.36	0.11	0.03	0.04	0.18
WG/NRMAS 70:30	18	3.6	42	0.27	0.08	0.02	0.03	0.14
WG/NRMAS 80:20	12	2.4	48	0.18	0.05	0.01	0.02	0.09
WG/NRMAS 90:10	6	1.8	54	0.09	0.03	0.01	0.01	0.05

ตารางที่ 4-2 สภาวะและสัดส่วนสารเคมีที่ใช้ในการบ่มยาง

ลำดับที่	สารเคมี	สัดส่วน (phr)	อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ (rpm)	เวลาในการผสม (min)
1	NR	-	120	60	20
2	MA	20	120	60	10
3	WG	-	120	70	10
4	ZnO	5	120	50	5
	SA	1.5			
5	TMTD	0.4	120	50	5
	TBBS	0.6			
6	Sulfur	2.5	120	50	5

*** คิดเป็น phr เทียบกับปริมาณยาง NR ที่เติม

4.4.4 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมโดยกระบวนการอัด (Compression molding)

ในการขึ้นรูปชิ้นงานทำโดยการ pre-heat แม่พิมพ์ เป็นเวลา 1 นาที ที่อุณหภูมิ 150 °C ต่อมาทำการกดอัด เป็นเวลา 5 นาทีด้วยแรงกด 1500 psi ที่อุณหภูมิ 150 °C และ cooling เป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมมาตัดเป็นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ (Laser cutter) โดยใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเลเซอร์ (speed) ในการตัด คือ 35 และใช้พลังงานในการตัดชิ้นงาน 40 เพื่อนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

4.4.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

ทำการตรวจสอบบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานที่แช่ในไนโตรเจนเหลว โดยนำชิ้นงานไปเคลือบทองด้วยเครื่อง Sputter Coater แล้วทำการทดสอบด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ที่ความต่างศักย์ 15 kv

4.4.6 การศึกษาสมบัติการดึงยึด (Testing of Tensile Properties)

ตัดชิ้นงานให้ชิ้นงานมีรูปร่างและขนาดตามมาตรฐาน ASTM D638-10 Standard test method for tensile properties of plastics นำชิ้นงานมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ (Universal Tensile Testing Machine) รุ่น Instron-5969 โดยในการทดสอบจะใช้ความเร็วในการดึงเป็น 50 mm/min และดึงในทิศทางขนานกับแนวยาวของชิ้นงานโดยจะทำการทดสอบเป็นจำนวน 15 ชิ้นงาน เพื่อหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากนั้นนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณและพลอตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด พร้อมทั้งคำนวณค่าความทนทานต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสที่ความเครียดต่าง ๆ

4.4.7 การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Testing)

ตัดชิ้นงานให้ชิ้นงานมีรูปร่างและขนาดตามมาตรฐาน ASTM D256-10 Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics นำชิ้นงานมาวัดความกว้างและความหนาของชิ้นงาน จากนั้นทำการบากชิ้นงานทุกชิ้นด้วยเครื่องบากชิ้นงาน แล้วทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Tester) รุ่น Pendulum Impact Tester B5102.202 4 J โดยใช้วิธี Izod ซึ่งจะให้ค่าพลังงานที่ใช้ในการ-กระแทกชิ้นงานออกมา นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกหรือความต้านทานการกระแทกของวัสดุตั้งสมการที่ 4-2

$$E = mg(h' - h'') \quad (4-2)$$

เมื่อ	E	คือ	พลังงานที่ได้จากการปล่อยตุ้มน้ำหนัก (Nm)
	m	คือ	มวลของตุ้มน้ำหนัก (kg)
	h', h''	คือ	ความสูงของลูกตุ้มก่อนและหลังกระแทก (m)
	g	คือ	อัตราเร่งจากแรงดึงดูดของโลก (9.81 m/s^2)

4.4.8 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน (Thermalgravimetric Analysis : TGA)

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของสารจะทดสอบด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) ของบริษัท Perkin Elmer รุ่น TGA7HT โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะทำการตัดจากตัวอย่างชิ้นงานที่ได้ทำการขึ้นรูปไว้ ใช้น้ำหนักประมาณ 3-10 มิลลิกรัม แล้วบรรจุลงในถ้วย (pan) ที่แขวนอยู่บน micro balance จากนั้นทำการทดสอบโดยใช้ช่วงอุณหภูมิจาก 30-800 °C และใช้อัตราการให้ความร้อนเป็น 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน หลังจากทำการทดสอบเสร็จแล้ว นำถ้วย (pan) เช็ดด้วยอะซิโตนให้สะอาด และเผาไฟเพื่อกำจัดส่วนที่เหลือตกค้างให้หลุดไปก่อนที่จะทำการทดสอบต่อไป

4.4.9 การศึกษาสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Differential scanning calorimetry: DSC)

การศึกษาสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนทำของสารจะทดสอบด้วยเครื่อง DSC 1 Module METTLER TOLEDO STARE SYSTEM โดยนำชิ้นงานที่มีน้ำหนัก 0.5-1.0 กรัม มาอัดใส่ pan จากนั้นทำการทดสอบที่สภาวะดังนี้

ขั้นที่	อุณหภูมิ
1	คงอุณหภูมิที่ -80 °C เป็นเวลา 1 นาที
2	ให้ความร้อนจาก -80 °C ไปจนถึง 150 °C
3	คงอุณหภูมิที่ 150 °C เป็นเวลา 1 นาที
4	ลดอุณหภูมิลงมาจาก 150 °C เป็น -80 °C
5	คงอุณหภูมิที่ -80 °C เป็นเวลา 1 นาที
6	ให้ความร้อนจาก -80 °C ไปจนถึง 150 °C

4.4.10 ความต้านทานต่อการดูดซึมน้ำ (water absorption)

อบชิ้นงานที่ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำหรือความชื้นในชิ้นงาน นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักก่อน (W_1) จากนั้นนำชิ้นงานไปแช่น้ำกลั่น เมื่อเวลาผ่านไป 5, 10, 15, 25, 35, 50, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 720, 1440 และ 4320 นาที นำชิ้นงานออกจากน้ำและใช้กระดาษชำระซับน้ำบนผิวชิ้นงานให้แห้ง และชั่งน้ำหนักชิ้นงาน (W_2) หลังจากชั่งน้ำหนัก แล้วนำชิ้นงานแช่กลับลงไปในน้ำ ทำการจับเวลาต่อไป คำนวณหา % water absorption จากสมการที่ 4-3

$$\% \text{ water absorption} = \left[\frac{W_2 - W_1}{W_1} \right] \times 100 \quad (4-3)$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำกลั่น (กรัม)

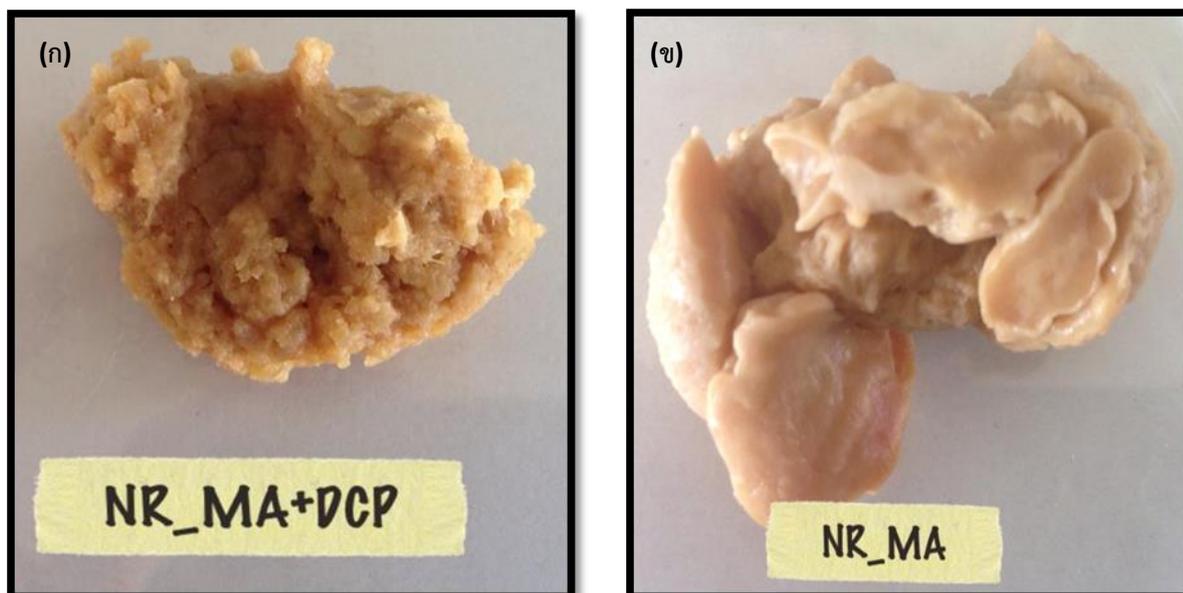
W_2 คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่น้ำกลั่น ที่เวลาใดๆ (กรัม)

5. ผลการวิจัยและวิจารณ์

5.1 ยางธรรมชาติที่ถูกตัดแปรรูปด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมยางที่ถูกตัดแปรรูปด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (NRMA) ด้วยกัน 2 วิธี คือวิธีแรกจะเตรียมยางธรรมชาติที่ทำการกราฟท์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์โดยใช้ initiator คือ dicumyl peroxide (DCP) ปริมาณ 1 phr และวิธีที่สองนั้นจะไม่มีการใช้ initiator โดยทั้งสองวิธีใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 20 phr

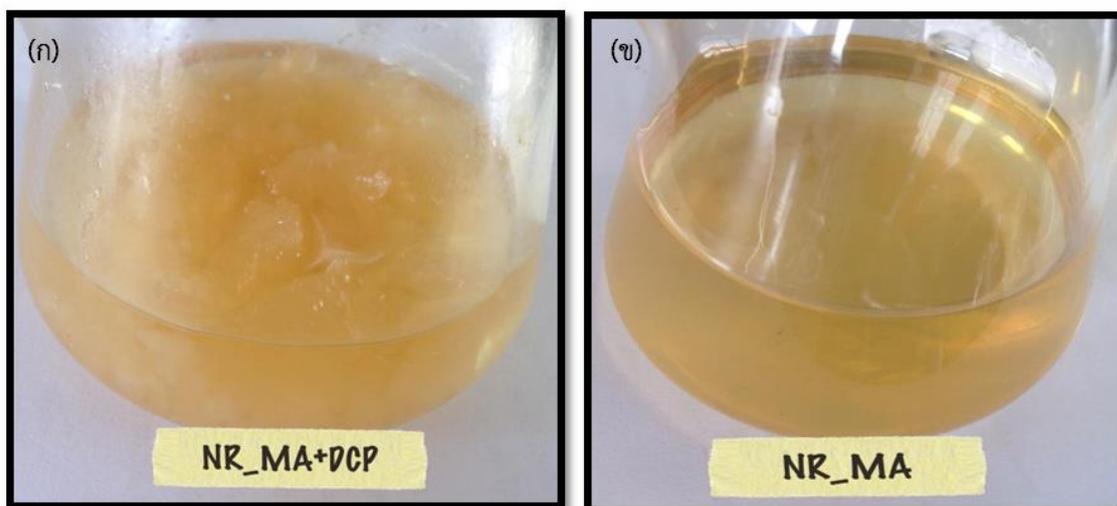
การเตรียมยางธรรมชาติที่ทำการกราฟท์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์นั้นจะเริ่มจากนำยางธรรมชาติมาบดให้นิ่ม (Masticate) เป็นเวลา 20 นาทีในเครื่อง internal mixer แล้วทำการเติมมาลิกแอนไฮไดรด์ และ DCP ลงไปพร้อมกันในอ่างที่บดแล้ว และทำการผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 120 °C ในขณะที่วิธีการที่ไม่มีการใช้ initiator นั้นจะทำการเติมมาลิกแอนไฮไดรด์ลงในยางธรรมชาติที่ผ่านการบดให้นิ่มแล้ว เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 120 °C โดยยางที่เตรียมได้จะแสดงดังรูปที่ 5-1



รูปที่ 5-1 ลักษณะยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟท์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ ก) ที่เติม initiator และ ข) ที่ไม่เติม Initiator

เมื่อพิจารณารูปที่ 5-1 จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟท์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (NRMA) ที่มีการเติม initiator คือ DCP (รูปที่ 5-1 ก) นั้นมีลักษณะเนื้อยางที่ขรุขระ ในขณะที่ยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟท์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ที่ไม่ได้เติม initiator (รูปที่ 5-1 ข) นั้นยางมีลักษณะเกาะกลุ่มกันอยู่และมีลักษณะเรียบเนียนกว่ายางที่ถูกกราฟท์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ที่มีการเติม DCP

หลังจากนั้นได้นำยางที่เตรียมได้จากทั้ง 2 วิธีการมาทดสอบการละลายในโทลูอีน ซึ่งโทลูอีนเป็นตัวทำละลายที่ดีของยาง โดยนำยางที่เตรียมได้ทั้ง 2 วิธีมาอย่างละ 3 กรัม แล้วนำไปแช่ในโทลูอีนปริมาตร 200 มิลลิลิตร โดยทำการกวนปั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ได้ผลแสดงดังรูปที่ 5-2



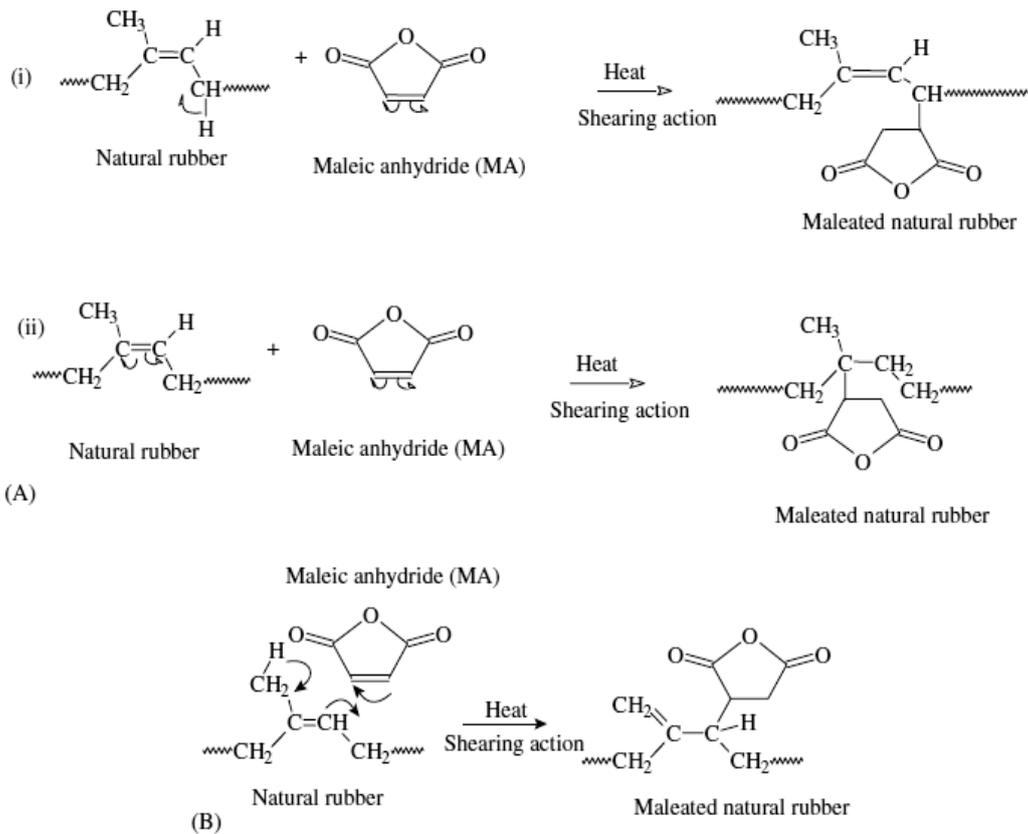
รูปที่ 5-2 ลักษณะของยางที่ละลายในตัวทำละลายโทลูอีน ก) ยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟท์ด้วยมาลิอิก แอนไฮไดรด์ที่เติม initiator และ ข) ยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟท์ด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่ไม่เติม initiator

เมื่อพิจารณารูปที่ 5-2 จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟท์ด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่เติม Initiator นั้นไม่ละลายในโทลูอีนแต่จะพบว่าเกิดการบวมตัวเนื่องจากยางเกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) ไปบางส่วนแล้ว ในขณะที่ยางที่ถูกกราฟท์ด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่ไม่เติม DCP นั้นสามารถละลายได้หมดในตัวทำละลายโทลูอีน นอกจากนี้ยังได้นำยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟท์ด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่เติม initiator มาหาค่า gel fraction โดยการนำยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟท์ด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่เติม initiator มากรองแยกตะกอน แล้วอบในตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงค่อยนำมาชั่งน้ำหนัก จากการคำนวณจะได้ค่า gel fraction ประมาณ 53% ซึ่งก็คือปริมาณยางที่เกิดการเชื่อมขวางแล้วนั่นเอง

จากลักษณะทางกายภาพและการละลายข้างต้น ยางธรรมชาติที่ถูกกราฟท์ด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่ไม่เติม initiator ไม่เกิดการเชื่อมขวางกันระหว่างสายโซ่ของยางด้วยตัวเอง ในขณะที่ยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟท์ด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่เติม initiator นั้น จะเกิดการเชื่อมขวางในขณะที่ผสมใน internal mixer เมื่อนำยางที่ถูกเชื่อมขวางแล้วนี้มาผสมกับบกลูเตน (WG) อาจทำให้การกระจายตัวของยาง และ WG ในพอลิเมอร์ผสมไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกการกราฟท์มาลิอิกแอนไฮไดรด์ลงบนยางธรรมชาติโดยไม่มีการใส่ initiator เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการเชื่อมขวางของยางก่อนการผสม WG

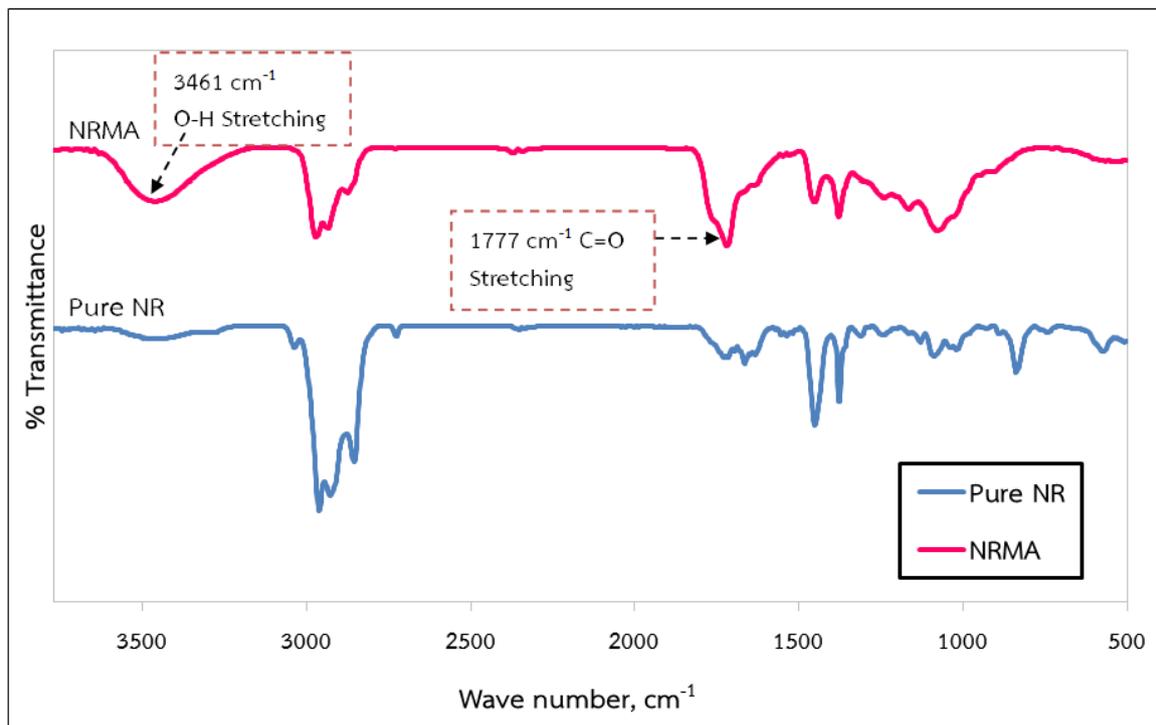
5.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของยางที่ถูกตัดแปรด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สสารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)

จากผลการทดลองในข้อ 5.1 ผู้วิจัยทำการเตรียมยางธรรมชาติที่ถูกตัดแปรด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ (NRMA) โดยการผสมยางธรรมชาติและมาลิอิกแอนไฮไดรด์ลงใน internal mixer ภายใต้สภาวะที่มีแรงเฉือนที่อุณหภูมิสูง โดยไม่ต้องมีการใช้ initiator ซึ่งปฏิกิริยาการกราฟท์มาลิอิกแอนไฮไดรด์ลงบนสายโซ่ของยางธรรมชาติที่สามารถเกิดขึ้นได้ตามกลไกที่แสดงในรูปที่ 5-3



รูปที่ 5-3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของมาลิกแอนไฮไดรด์และยางธรรมชาติ (A) กลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบ Free radical (B) กลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบ Diels-Alder reaction [22]

หลังจากที่ทำกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติใน internal mixer เป็นเวลา 10 นาที จะนำยาง NRMA มากำจัดมาลิกแอนไฮไดรด์ที่ไม่เกิดการกราฟท์บนยางออกไปก่อนการพิสูจน์เอกลักษณ์ โดยนำยางธรรมชาติที่ถูกกราฟท์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์มาละลายในตัวทำละลายโทลูอีน ต่อมาทำการตกตะกอนยางที่ถูกกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์โดยใช้อะซิโตน และจึงนำยางที่ถูกกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์มาพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR โดยที่สเปกตรัมของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ถูกกราฟท์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์แสดงในรูปที่ 5-4



รูปที่ 5-4 FTIR spectrum ของยางธรรมชาติ (NR) ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผ่านการกราฟท์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (NRMA)

จากสเปกตรัมของยางธรรมชาติ (NR) ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิค FTIR จะพบแถบการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่ตำแหน่งเลขคลื่น ดังต่อไปนี้

2962 cm^{-1}	คือ	C-H stretching ($-\text{CH}_3$)
1663 cm^{-1}	คือ	C=C stretching
1447 cm^{-1}	คือ	C-H bending ($-\text{CH}_2$)
1372 cm^{-1}	คือ	C-H bending ($-\text{CH}_3$)
830 cm^{-1}	คือ	C=C bending

ในขณะที่สเปกตรัมของยาง NRMA ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิค FTIR จะพบแถบการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1777 cm^{-1} คือ C=O stretching ของมาลิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟท์บนยางธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Z. Zeng และคณะ [21] ที่นำมาลิกแอนไฮไดรด์มากราฟท์ลงบนโมเลกุลของยางธรรมชาติ พบว่าปรากฏพีกที่มีตำแหน่งเลขคลื่น 1784 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง C=O stretching ของมาลิกแอนไฮไดรด์ และจากสเปกตรัมของยาง NRMA ยังพบพีกที่มีตำแหน่งเลขคลื่น 3461 cm^{-1} ซึ่งน่าจะเป็นพีก O-H stretching ของหมู่คาร์บอกซิลิก ซึ่งเกิดจากแอนไฮไดรด์ที่อยู่บนสายโซ่ของยางบางส่วนเกิดไฮโดรไลซิสกลายเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก จากการปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 1777 และ 3461 cm^{-1} เป็นการยืนยันได้ว่าการเกิดการกราฟท์ของมาลิกแอนไฮไดรด์ลงบนโมเลกุลของยางธรรมชาติได้จริง

5.3 การหาปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ที่ถูกกราฟท์ลงบนยางธรรมชาติด้วยเทคนิคการไตเตรตขั้น

การหาปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ที่ถูกกราฟท์บนยางธรรมชาติสามารถทำได้โดยการไตเตรตสารละลายยาง NRMA กับสารละลาย KOH โดยสารละลาย KOH จะทำปฏิกิริยากับกรดที่เกิดจากหมู่แอนไฮไดรด์ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำกลั่น โดยปริมาณของ MA ที่ถูกกราฟท์บนยางธรรมชาติแสดงในสมการต่อไปนี้

$$MA(\%wt) = \frac{(V_1 - V_0)N}{2w} \times 98 \times 100$$

เมื่อ	N	คือ ความเข้มข้นของ potassium hydroxide (KOH) ที่ละลายใน Methanol/benzyl alcohol (โมล/ลิตร)
	V ₁	คือ ปริมาตรของ KOH ที่ใช้ในการไตเตรตสารละลายยาง (ลิตร)
	V ₀	คือ ปริมาตรของ KOH ที่ใช้ในการไตเตรตสารละลายมาตรฐาน (ลิตร)
	W	คือ น้ำหนักของ NRMA (กรัม)

ตารางที่ 5-1 ปริมาตรของ KOH และ % การกราฟท์ของ MA บนยางธรรมชาติ

ปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์ที่เติมในยางธรรมชาติ	ปริมาตรของ KOH (mL)	% graft MA
20 phr	51.0	1.782
Blank test	0.10	-

จากตารางที่ 5-1 พบว่าเมื่อทำการเติมมาลิกแอนไฮไดรด์ลงไป 20 phr ปริมาณการกราฟท์ของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติ คือ 1.782 % เมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ เช่นงานวิจัยของ Z. Zeng และคณะ [21] ซึ่งได้ผสมยางธรรมชาติและมาลิกแอนไฮไดรด์โดยใช้เครื่อง internal mixer ที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 8 นาที พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ประมาณ 10.5 % ของยางธรรมชาติที่เติมมาลิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 20 phr เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ในงานวิจัยนี้ พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การกราฟท์ที่ต่ำกว่าในงานวิจัยของ Z. Zeng และคณะ อาจจะเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์บนยางในงานวิจัยของ Z. Zeng และคณะ มีอุณหภูมิที่สูงกว่าในงานวิจัยนี้ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ 120 °C อีกทั้งยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยของ Z. Zeng และคณะ ใช้ยางธรรมชาติ (RSS1) ซึ่งเป็นยางแผ่นรมควัน ซึ่งต่างจากงานวิจัยนี้ที่ใช้ยางธรรมชาติ (STR5L) ซึ่งเป็นยางก้อนที่ไม่ได้รมควัน ดังนั้นอุณหภูมิในการกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์บนยาง และยางที่ต่างชนิดกันอาจส่งผลต่อปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์ที่ถูกกราฟท์บนสายโซ่ของยางธรรมชาติ

5.4 การทดสอบหาพฤติกรรมการเชื่อมขวางของยาง

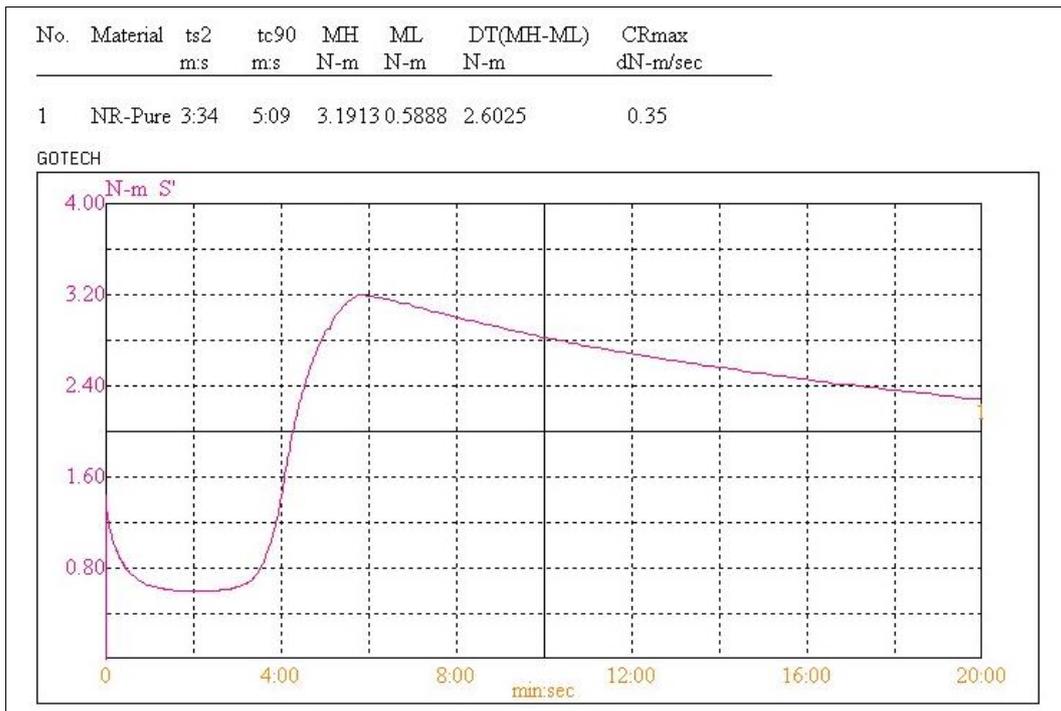
การศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมขวางของยางสามารถทำได้โดยการใช้เครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) เพื่อให้ทราบถึง (1) เวลาสกอร์ช (scorch time, t_{s2}) (2) เวลาในการคงรูป (cure time, t_{c90}) (3) ค่าแรงบิดต่ำสุด (ML) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความหนืด (viscosity) ของยางหรือบอกถึงความสามารถในการไหลของยาง (4) ค่าแรงบิดสูงสุด (MH) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแกร่งของยางผสมที่เกิดการเชื่อมขวางแล้ว (5) ค่าความแตกต่างของแรงบิด (DT หรือ MH-ML) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (crosslink density) และ (6) อัตราเร็วในการคงรูปยางซึ่งหาได้จากความชันของกราฟระหว่างแรงบิดและเวลาในช่วงที่เกิดการเชื่อมขวางของยาง ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษากิจกรรมการเชื่อมขวางของยางในยาง NR, ยาง NRMA และพอลิเมอร์ผสม WG กับ NR (WG/NR) และ WG กับ NRMA (WG/NRMA) ที่อัตราส่วน 50:50 หลังจากที่ทำกรผสมสารเคมีที่ทำให้ยางเกิดการเชื่อมขวางลงในยางและพอลิเมอร์ผสมในเครื่อง internal mixer แล้ว

ในกรณีของพอลิเมอร์ผสม WG/NR และ WG/NRMA จะทำการศึกษากิจกรรมการเชื่อมขวางของยางที่อัตราส่วน 50:50 เท่านั้น เนื่องจากพอลิเมอร์ผสม WG/NRMA ที่อัตราส่วน 90:10 ถึง 60:40 มีวิฤภาคของ WG ปริมาณมาก ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีลักษณะที่ค่อนข้างแข็ง ถ้านำพอลิเมอร์ผสมในช่วงอัตราส่วนดังกล่าวมาทดสอบในเครื่อง MDR จะทำให้ต้องใช้แรงบิดที่สูง ซึ่งอาจทำให้เครื่อง MDR เกิดความเสียหาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกเฉพาะพอลิเมอร์ผสม WG/NR และ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 50:50 เท่านั้นในการทดสอบ

ตารางที่ 5-2 แสดงค่า cure characteristics ของตัวอย่างพอลิเมอร์สูตรต่างๆ ที่ทดสอบด้วยเครื่อง MDR ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 20 นาที และรูปที่ 5-5 ถึง 5-8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง torque และเวลาของ ยาง NR, ยาง NRMA และพอลิเมอร์ผสม WG/NR และ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 50:50 ที่ทดสอบด้วยเครื่อง MDR ตามลำดับ

ตารางที่ 5-2 ค่า Parameter ต่างๆ ที่ได้จากเครื่อง Moving Die Rheometer

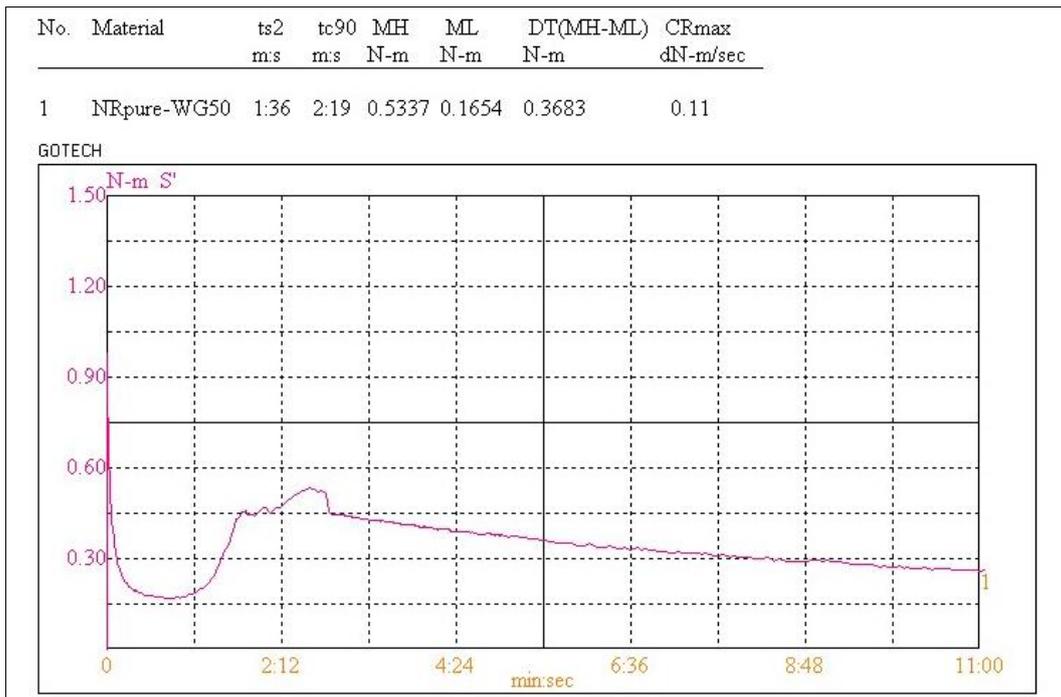
งานวิจัย	Materials	Scorch time (t_{s2}) (m.s)	Cure time (t_{c90}) (m.s)	Max. torque (MH) (N-m)	Min. torque (ML) (N-m)	DT(MH-ML) (N-m)	Cure rate (dN-m/sec)
งานวิจัยนี้	NR	3.34	5.09	3.19	0.59	2.60	0.35
	WGNR (50:50)	1.36	2.19	0.53	0.17	0.37	0.11
	NRMA	0.00	12.55	0.63	0.48	0.15	0.01
	WG/NRMA (50:50)	2.05	2.49	1.04	0.31	0.73	0.13



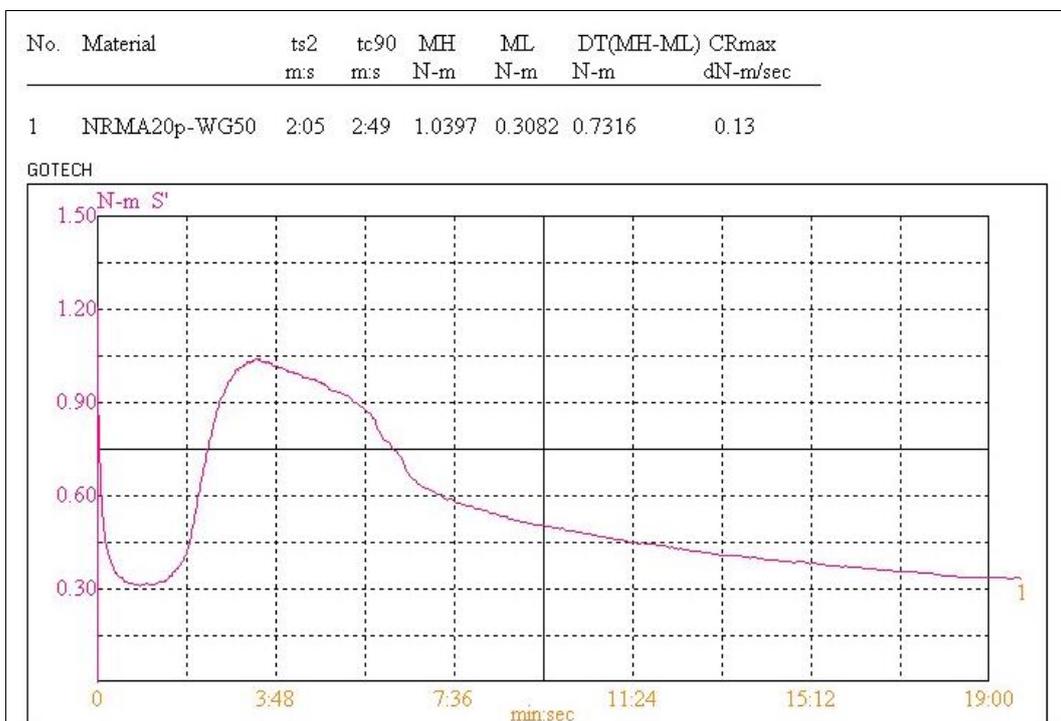
รูปที่ 5-5 Cure characteristic ของ NR ที่อุณหภูมิ 150 °C



รูปที่ 5-6 Cure characteristic ของ NRMA ที่อุณหภูมิ 150 °C

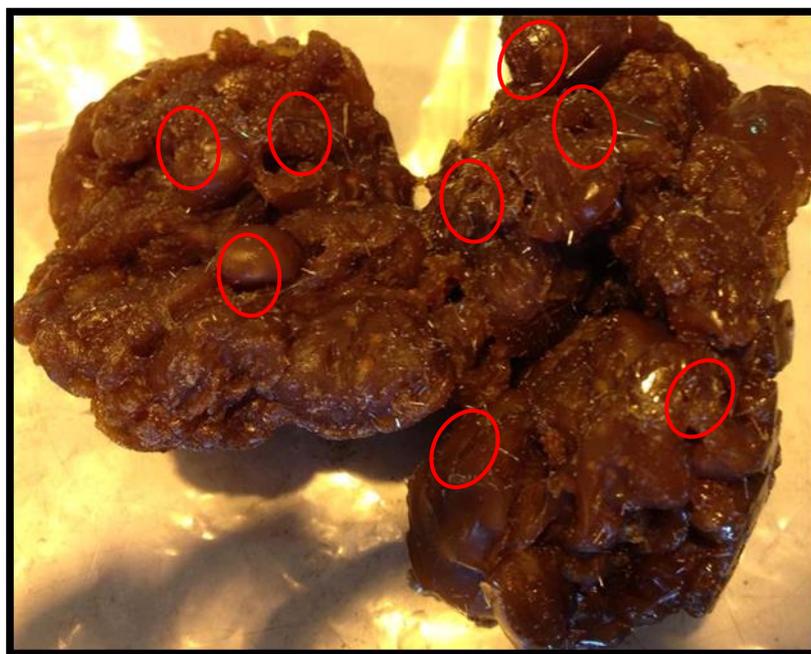


รูปที่ 5-7 Cure characteristic ของ WG/NR ที่อัตราส่วน 50:50 ที่อุณหภูมิ 150 °C



รูปที่ 5-8 Cure characteristic ของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 50:50 ที่อุณหภูมิ 150 °C

จากตารางที่ 5-2 และรูปที่ 5-5 และ 5-6 เมื่อพิจารณาขง NR และขงที่ถูกกราฟท์ด้วย MA (NRMA) พบว่าขง NRMA ค่า cure time มีค่าสูงมากและค่า DT มีค่าต่ำมาก รวมทั้งค่า cure rate มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขง NR ที่ไม่มีการกราฟท์ด้วย MA การที่ขง NRMA ปรากฏค่า DT และ cure rate ที่ต่ำนี้เป็นการบ่งบอกว่ขง NRMA เกิดการเชื่อมขวงที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขง NR และเมื่อสังเกตลักษณะของพื้นผิวขง NRMA หลังจากการทดสอบด้วยเครื่อง MDR พบว่าขง NRMA มีลักษณะเหนียวเหนอะไม่คงรูปและฉีกขาดได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับขง NR ซึ่งเกิดการคงรูปในสภาวะการทดสอบในเครื่อง MDR การที่ขงเกิดการเชื่อมขวงน้อยมาก อาจเนื่องมาจากขง NRMA ที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นขงที่ไม่ได้มีการกำจัด MA ที่มากเกินไป โดยมี MA ที่เหลืออยู่ปริมาณมากที่ไม่ได้ถูกกราฟท์ลงบนสายโซ่ของขง ดังรูปที่ 5-9 ซึ่งแสดงพื้นผิวของขง NRMA ที่เตรียมได้ โดยจะสังเกตเห็นผลึกรูปเข็มของ MA ที่ไม่ได้ถูกกราฟท์ลงในขงเป็นจำนวนมาก ปริมาณ MA ที่เหลืออยู่มากในขง NRMA จะทำหน้าที่เป็นตัวหน่วง (Retarder) ต่อปฏิกิริยาการเชื่อมขวงของขง [33] ดังนั้นจึงส่งผลให้อัตราเร็วในการเชื่อมขวงและความหนาแน่นในการเชื่อมขวงต่ำมาก



รูปที่ 5-9 แสดงผลึกของมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่อยู่บนผิวของขง NRMA

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับขง NR (รูปที่ 5-5) และ WG/NR ที่อัตราส่วน 50:50 (รูปที่ 5-7) พบว่าค่า cure time, ค่าความแตกต่างของแรงบิด (DT) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกความหนาแน่นของการเชื่อมขวงของขง และค่า cure rate ของขง NR มีค่าสูงกว่าของพอลิเมอร์ผสม WG/NR เนื่องมาจากในตัวอย่างขง NR เพียงอย่างเดียวมีวิภาคของขงอยู่มากกว่าในตัวอย่างที่เป็นพอลิเมอร์ผสม WG/NR เมื่อเทียบกับน้ำหนักรวมของตัวอย่างที่เท่ากัน ทำให้ขง NR ต้องใช้เวลานานกว่าในการเกิดการเชื่อมขวง รวมทั้งมีความหนาแน่นของขงที่ถูกเชื่อมขวงและมี cure rate ที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม

ในกรณีของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 50:50 (รูปที่ 5-8) เปรียบเทียบกับ NRMA (รูปที่ 5-8) พบว่า WG/NRMA มี cure time ต่ำกว่า และมีค่า DT และ cure rate สูงกว่าอย่าง NRMA ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม WG/NRMA เกิดการเชื่อมขวางได้มากกว่าอย่าง NRMA อาจเนื่องมาจาก กลูเตนมีขี้้วมากกว่าอย่างธรรมชาติ และ MA มีความเป็นขี้้วมากกว่าอย่างด้วยเช่นกัน ดังนั้น MA ที่อยู่ในวัฏภาคของยางอาจชอบที่จะชอบเข้าไปอยู่ในวัฏภาคของ WG มากกว่าอย่างจึงทำให้ทำให้ปริมาณ MA ที่มีอยู่ปริมาณมากในวัฏภาคของยางลดลง ทำให้การหน่วงปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของ NRMA ได้น้อยลง ดังนั้นยาง NRMA ในพอลิเมอร์ผสมจึงมีโอกาสเกิดการเชื่อมขวางได้มากขึ้น

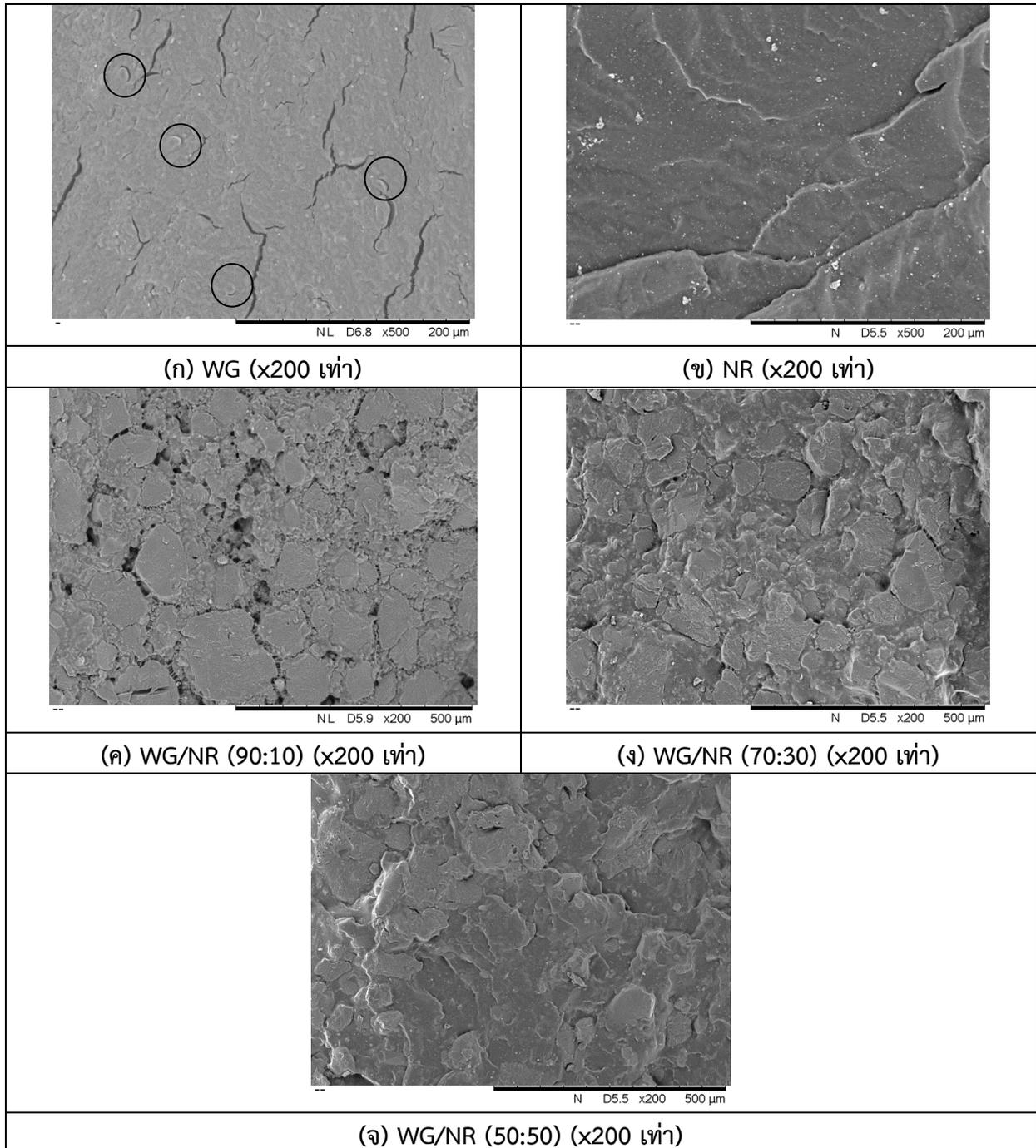
จากรูปที่ 5-6 พบว่าพฤติกรรมเกิดการเชื่อมขวางของยาง NRMA ที่ผสมกลูเตนด้วยอัตราส่วน 50:50 นั้นพบว่าเกิดการ Reversion ขึ้นอย่างมากเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที แสดงถึงพันธะไดซัลไฟด์ที่เกิดการเชื่อมขวางในวัฏภาคของยางถูกทำลาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการเลือกเวลาในการกดอัดขึ้นรูปชิ้นงานที่เวลา 5 นาทีและใช้อุณหภูมิ 150 °C

5.5 การศึกษาพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม WG/NR และ WG/NRMA

ลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม WG/NR และ WG/NRMA ที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถศึกษาได้ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) โดยนำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมมาทำการแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ชิ้นงานแข็งตัวแล้วจึงทำการหักชิ้นงานทันที จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปศึกษาเพื่อดูลักษณะทางพื้นฐานวิทยาและการกระจายตัวของวัฏภาค WG และยางในพอลิเมอร์ผสม SEM micrographs ของพอลิเมอร์ผสม WG/NR และ WG/NRMA แสดงในรูปที่ 5-10 และรูปที่ 5-11 ตามลำดับ

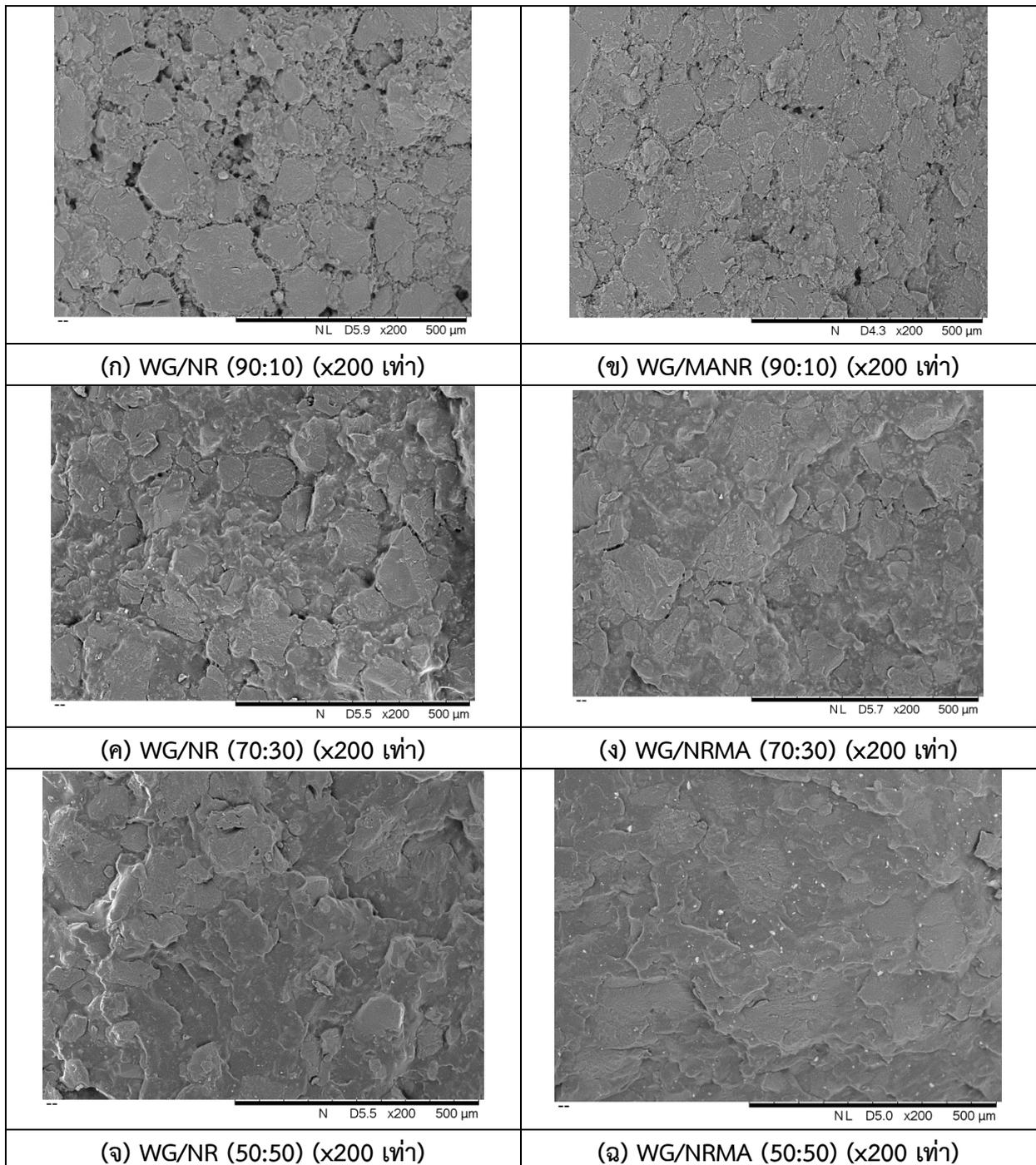
เมื่อพิจารณารูปที่ 5-10 พบว่า SEM micrograph ของ Pure WG (รูปที่ 5-10 (ก)) ปรากฏเป็นพื้นผิวที่เรียบ การที่พื้นผิวของชิ้นงาน WG มีลักษณะค่อนข้างเรียบนั้น แสดงให้เห็นถึงการแตกหักแบบเปราะ และจะสังเกตเห็นรอยแตกบนพื้นผิวของ WG นั้นเกิดจากความเย็นจัดของไนโตรเจนเหลวที่แช่ตัวอย่าง WG จึงทำให้ WG ที่มีลักษณะเปราะเกิดรอยแตกขึ้นบนพื้นผิว นอกจากนี้ยังพบอนุภาคเม็ดแป้ง (starch) กระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิวของ WG (วงกลมสีดำในรูปที่ 5-10 (ก)) ซึ่งในกระบวนการแยกกลูเตนออกจากแป้งสาลี (wheat flour) นั้นต้องทำการล้างแป้งออกจาก wheat flour เพื่อให้เหลือแต่ส่วนที่เป็นโปรตีน (กลูเตน) ให้มากที่สุด ดังนั้นกลูเตนที่ได้จึงยังคงมีแป้งหลงเหลืออยู่บางส่วน ส่วน รูปที่ 5-10 (ข) ซึ่งเป็นชิ้นงานของยางธรรมชาติจะพบว่าพื้นผิวมีลักษณะไม่เรียบ ซึ่งลักษณะเช่นนี้เป็นการแตกหักแบบ ductile และจะเห็นได้ว่าที่พื้นผิวนั้นจะมีจุดสีขาวๆ ซึ่งเป็นอนุภาคของสาร ZnO หรือ sulfur ที่เติมลงเพื่อทำให้ยางเกิดการเชื่อมขวาง เมื่อพิจารณาที่รูปที่ 5-10 (ค), (ง) และ (จ) ซึ่งเป็น SEM micrograph ของพอลิเมอร์ผสม WG/NR ที่อัตราส่วน 90/10, 70/30 และ 50/50 พบว่ามีการแยกเฟสกันระหว่างวัฏภาคกลูเตนกับวัฏภาคยาง โดยวัฏภาคของ WG จะมีลักษณะเป็นอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันกระจายอยู่ในวัฏภาคของยางที่มีลักษณะเรียบเนียน การที่พบ WG เกาะรวมกลุ่มเป็นก้อนเนื่องจาก WG เป็นพอลิเมอร์ที่เป็นโปรตีนซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของกรดอะมิโนหลายชนิด โดยกรดอะมิโนแต่ละชนิดถูกเชื่อมกันด้วยพันธะเปปไทด์ อีกทั้งโมเลกุลของกลูเตนยังมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ที่แข็งแรง เช่น พันธะไฮโดรเจน พันธะไดซัลไฟด์ และพันธะไอออนิก เป็นต้น จึงทำให้ WG เมื่อได้รับความร้อนจะไม่สามารถหลอมเหลวได้เหมือนกับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป ดังนั้นเมื่อนำ WG มาผสมกับยางในเครื่อง internal mixer WG จึงเกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนกระจายตัวในวัฏภาคของยาง เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 90/10 (รูปที่ 5-10 (ค)) พบช่องว่างระหว่างกลุ่มก้อนของ WG อย่างชัดเจน เนื่องจากที่อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมนี้มีปริมาณของยาง NR ในพอลิเมอร์ผสมอยู่น้อยมาก ดังนั้นวัฏภาคของยางไม่สามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างเมทริกซ์ของกลูเตนได้อย่างทั่วถึงจึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างกลุ่ม

ก้อนของ WG แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณยาง NR ในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น เช่นที่อัตราส่วนผสม 70/10 และ 50/50 (รูปที่ 5-10 (ง) และ (จ)) ไม่ปรากฏช่องว่างระหว่างกลุ่มก้อนของ WG เนื่องจากยางเข้าไปแทรกตัวในเมทริกซ์ของกอลลูเตนได้มากขึ้นและปรากฏให้เห็นเป็นพื้นผิวของวัสดุอย่างที่เราเรียกว่าที่เรียบมากขึ้น



รูปที่ 5-10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวย่อยแตกหักภายหลังจากการแช่ชิ้นงานในไนโตรเจนเหลวที่กำลังขยาย 200 เท่า: (ก) WG, (ข) NR, (ค) WG/NR ที่อัตราส่วน 90/10, (ง) WG/NR ที่อัตราส่วน 70/30 และ (จ) WG/NR ที่อัตราส่วน 50/50

รูปที่ 5-11 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม WG/NR และ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 90/10, 70/30 และ 50/50



รูปที่ 5-11 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกหักภายหลังจากการแช่ชิ้นงานในไนโตรเจนเหลวที่กำลังขยาย 200 เท่า ของพอลิเมอร์ผสม WG/NR และ WG/NRMA: (ก) WG/NR ที่อัตราส่วน 90/10, (ข) WG/NRMA ที่อัตราส่วน 90/10, (ค) WG/NR ที่อัตราส่วน 70/30, (ง) WG/NRMA ที่อัตราส่วน 70/30, (จ) WG/NR ที่อัตราส่วน 50/50 และ (ฉ) WG/NRMA ที่อัตราส่วน 50/50

เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสม WG/NRMA ที่ทุกอัตราส่วน (รูปที่ 5-11 (ข), (ง) และ (ฉ)) พบว่าวัฏภาคของ WG จะมีลักษณะเป็นอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันกระจายอยู่ในวัฏภาคของยางเช่นเดียวกับที่พบในพอลิเมอร์ผสม WG/NR ดังแสดงในรูปที่ 5-10 ข้างต้น แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม WG/NR และ WG/NRMA พบว่าพอลิเมอร์ผสม WG/NRMA และพบว่าวัฏภาคของ WG มีความขรุขระน้อยลง และมีพื้นผิวของวัฏภาคยางและวัฏภาค WG มีความเรียบเนียน และมีความเข้ากันได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม WG/NR (รูปที่ 5-11 (ก), (ค) และ (จ)) การที่ยาง NRMA เข้ากันได้ดีกับ WG มากกว่ายาง NR เนื่องจากยาง NR ที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงโครงสร้างมีความไม่เป็นขั้วสูง ในขณะที่การกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรด์ลงบนยางธรรมชาติจะช่วยปรับปรุงความขั้วของยางมากขึ้น ดังนั้นนำยาง NRMA มาผสมกับ WG ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้วจึงทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีความเข้ากันได้มากกว่าพอลิเมอร์ผสม WG/NR นอกจากนี้มาลิกแอนไฮโดรด์ที่ถูกกราฟท์บนยางสามารถทำปฏิกิริยากับ side chain ของกรดอะมิโนในโปรตีน เช่น ไลซีน (lysine) ซีรีน (serine) ทรีโอนีน (threonine) ซีสตีอีน (cysteine) และอาร์จินีน (arginine) ดังนั้นมาลิกแอนไฮโดรด์ที่กราฟท์อยู่บนยางธรรมชาติจึงทำหน้าที่เป็นสารคู่ควบ (coupling agent) ที่ทำให้ WG และยางธรรมชาติเข้ากันได้

5.6 การศึกษาสมบัติการต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile testing)

ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการดึงยืดตามมาตรฐาน ASTM D638-10 Standard test method for tensile properties of plastics ของชิ้นงานพลาสติกจากกลูเตนที่ผสมกับยางธรรมชาติทั้งที่ไม่มีการกราฟท์ด้วยมาลิกแอนไฮโดรด์ (WG/NR) และที่มีการกราฟท์ด้วยมาลิกแอนไฮโดรด์ (WG/NRMA) แสดงในตารางที่ 5-3 และ 5-4 ซึ่งแสดงค่า Modulus, Maximum tensile strength และ %Elongation at break ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 5-3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม WG/NR ที่อัตราส่วนต่างๆ

ชิ้นงาน	Modulus (MPa)	Maximum tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
Pure WG	1697.08 ± 6.53	37.60 ± 6.03	2.75 ± 1.00
WG/NR 90:10	762.49 ± 21.45	3.53 ± 0.17	2.32 ± 0.13
WG/NR 80:20	103.13 ± 24.60	2.98 ± 0.06	28.31 ± 6.60
WG/NR 75:25	53.20 ± 8.41	2.25 ± 0.07	53.52 ± 3.50
WG/NR 70:30	33.30 ± 4.20	2.01 ± 0.04	71.21 ± 4.00
WG/NR 60:40	12.60 ± 15.00	1.39 ± 1.43	127.12 ± 14.30
WG/NR 50:50	5.02 ± 0.52	1.22 ± 0.16	685.48 ± 30.80

ตารางที่ 5-4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม WG/NRMA ที่อัตราส่วนต่างๆ

ชิ้นงาน	Modulus (MPa)	Maximum tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
Pure WG	1697.08 ± 6.53	37.60 ± 6.03	2.75 ± 1.00
WG/NRMA (90:10)	931.73 ± 80.54	5.15 ± 0.59	2.93 ± 0.17
WG/NRMA (80:20)	124.12 ± 11.40	4.28 ± 0.40	10.50 ± 2.00
WG/NRMA (75:25)	43.67 ± 4.16	4.47 ± 0.32	29.80 ± 4.82
WG/NRMA (70:30)	23.61 ± 2.35	4.85 ± 0.38	43.10 ± 3.91
WG/NRMA (60:40)	8.30 ± 1.09	4.69 ± 0.57	101.14 ± 11.20
WG/NRMA (50:50)	5.58 ± 0.52	4.13 ± 0.21	242.29 ± 28.30

จากตารางที่ 5-3 และตารางที่ 5-4 แสดงค่าสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน WG/NR และ WG/NRMA พบว่าชิ้นงาน WG มีค่า modulus และ tensile strength เท่ากับ 1697 MPa และ 37 MPa ซึ่งมีค่าที่สูงมาก แต่ %elongation at break มีค่าต่ำ (2.75%) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อนำ WG ไปขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงภายใต้แรงกดอัดจะทำให้เกิดการเชื่อมขวางกันของหมู่ไทออล (-SH) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้เกิดเป็นพันธะไดซัลไฟด์ (-S-S-) ทำให้ชิ้นงาน WG มีความแข็งแรงที่สูงและมีลักษณะที่แข็งเปราะ

เมื่อพิจารณาค่า Young's modulus และ maximum tensile strength ของพอลิเมอร์ผสม WG/NR และ WG/NRMA พบว่ามีค่าต่ำกว่า pure WG ถึง ในขณะที่ค่า % elongation ของพอลิเมอร์ผสม WG/NR และ WG/NRMA มีค่าสูงกว่า pure WG ทั้งนี้เนื่องจากทั้งยาง NR และ NRMA มีความยืดหยุ่นที่สูงกว่า WG เมื่อทำการเติมยางลงไปจึงทำให้ปลดความแข็งแรง แต่จะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับ WG

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสมบัติเชิงกลของ WG/NR และ WG/NRMA ที่ทุกอัตราส่วนผสม พบว่าพอลิเมอร์ผสม WG/NRMA มีค่า tensile strength ที่สูงกว่า WG/NR ถึง 1.5-3.4 เท่า ในขณะที่อัตราส่วนผสมที่ 80:20 ถึง 50:50 พบว่า % elongation ของ WG/NR มีค่าสูงกว่า WG/NRMA ถึง 1.3-2.8 เท่า จากผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม WG/NRMA มีความแข็งแรง และมีความทนทานต่อการดึงยืดที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม WG/NR เนื่องมาจากยาง NRMA มีความสามารถเข้ากันได้ดีกับ WG มากกว่ายาง NR อีกทั้งหมู่ MA ที่อยู่บนสายโซ่ของยางอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีกับ side chain ของกรดอะมิโนในโปรตีนได้ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณยาง NR หรือ NRMA มากขึ้น ค่า modulus และ tensile strength จะลดลง ส่วนค่า % elongation เพิ่มขึ้นตามปริมาณยางที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสม

เมื่อพิจารณาปริมาณยาง NRMA ในพอลิเมอร์ผสมที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อปริมาณยาง NRMA ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 50% จะส่งผลให้ค่า modulus ลดลงอย่างมากถึง 167 เท่า และค่า tensile strength ลดลงเพียงเล็กน้อยคือ 1.25 เท่า ในขณะที่ เมื่อปริมาณยาง NRMA ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 50% จะทำให้ค่า elongation สูงขึ้นถึง 83 เท่า ดังนั้นการเพิ่มปริมาณยาง NRMA ในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น จะช่วยส่งเสริมความสามารถในการดึงยืด ของ WG ได้ดียิ่งขึ้น

5.7 การศึกษาสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact testing)

การทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D256-10 Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics ของชิ้นงานพลาสติก WG/NR และ WG/NRMA แสดงในตารางที่ 5-5

ตารางที่ 5-5 ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน WG/NR และ WG/NRMA

สูตร	อัตราส่วน	Impact strength (kJ/m ²)	ลักษณะการแตกหัก
WG	100/0	0.55 ± 0.13	แตกหักแบบสมบูรณ์
WG/NR	90/10	0.75 ± 0.14	แตกหักแบบสมบูรณ์
	80/20	2.13 ± 0.18	แตกหักแบบสมบูรณ์
	70/30	3.48 ± 0.23	ไม่แตกหัก
	60/40	-	ไม่แตกหัก
	50/50	-	ไม่แตกหัก
WG/NRMA	90/10	1.54 ± 0.62	แตกหักแบบสมบูรณ์
	80/20	4.74 ± 0.59	แตกหักแบบสมบูรณ์
	70/30	8.81 ± 0.87	แตกหักแบบสมบูรณ์
	60/40	-	ไม่แตกหัก
	50/50	-	ไม่แตกหัก

จากตารางพบว่าเมื่อกลูเตนได้รับแรงกระแทก กลูเตนจะมีค่าความทนแรงกระแทก (impact strength) ต่ำมาก คือมีค่า impact strength ประมาณ 0.6 kJ/m² เนื่องจากกลูเตนเมื่อนำไปขึ้นรูปด้วยความร้อนแล้วสายโซ่ของ WG จะเกิดการเชื่อมขวางกันระหว่างสายโซ่ของโปรตีนด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ซึ่งทำให้ WG ที่ขึ้นรูปแล้วมีลักษณะแข็งเปราะ ในขณะที่เมื่อมีการเติมยาง NR หรือยาง NRMA ลงไปใน WG พบว่าค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม WG/NR มีค่าสูงกว่า WG ถึง 1.4-6.3 เท่า และค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม WG/MRMA สูงกว่า WG มากถึง 2.8-16.0 เท่า โดยชิ้นงานที่มีปริมาณยางอยู่ 10, 20 และ 30% ชิ้นงานเกิดการแตกหักอย่างสมบูรณ์ เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระทำจะขาดออกจากกันเป็นสองชิ้น ในขณะที่ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยาง 40 และ 50% นั้นไม่สามารถวัดค่า impact strength ได้ เนื่องจากชิ้นงานไม่ขาดเมื่อได้รับแรงกระทำ ดังนั้นการเติมยาง NR หรือ NRMA ลงใน WG ช่วยส่งเสริมความต้านทานต่อแรงกระแทก และลดการดูดซึมน้ำของ WG

ในกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่มียาง NR และ NRMA นั้น ค่า impact strength ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณยางลงไปในพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากยางมีสมบัติที่ยืดหยุ่นได้ เมื่อยางได้รับแรงกระทำโมเลกุลของยางสามารถรับแรงและกระจายแรงได้ดี ดังนั้นชิ้นงานที่มีปริมาณของยางเพิ่มมากขึ้นจะมีค่าความทนแรงกระแทก สูงขึ้นด้วย เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า impact strength ของพอลิเมอร์ผสม WG/NR

และ WG/MRMA ที่ทุกอัตราส่วนผสม พบว่าชิ้นงาน WG/NRMA มีค่า impact strength สูงกว่าชิ้นงาน WG/NR ถึง 2.1-3.5 เท่า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากยาง NRMA มีความเข้ากันได้ดีกับ WG มากกว่ายาง NR ดังแสดงให้เห็นใน SEM micrograph ในรูปที่ 5-11 ก่อนหน้านี้ จากความเข้ากันได้ดีระหว่าง WG และ NRMA นี้ จึงทำให้ค่าความทนแรงกระแทกของ WG/NRMA สูงกว่า WG/NR

เมื่อพิจารณาปริมาณยาง NRMA ในพอลิเมอร์ผสมที่มีส่งผลต่อการต้านทานต่อแรงกระแทก พบว่าเมื่อปริมาณยาง NRMA ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 30% จะทำให้ค่า impact strength สูงขึ้นถึง 5.7 เท่า ดังนั้นการเพิ่มปริมาณยาง NRMA ในพอลิเมอร์ผสมมาก ความต้านทานต่อแรงกระแทก ของ WG ได้ดียิ่งขึ้น

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือเพื่อเตรียมพลาสติกชีวภาพจาก WG ที่มีความเหนียวเพิ่มขึ้นโดยการผสมกับยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรด้วยมาลิคิกแอนไฮไดรด์ (NRMA) โดยต้องการนำมาใช้เป็นพอลิเมอร์ทางเลือกในการลดการใช้พลาสติกสังเคราะห์ เช่น พอลิสไตรีนชนิดทนกระแทก (high impact polystyrene, HIPS) พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) และ พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) เป็นต้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และค่า impact strength ของพอลิเมอร์ผสม WG/NRMA ที่อัตราส่วน 70/30 และ 50/50 และพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากสารปิโตรเคมี 3 ชนิดคือ HIPS, HDPE (high density polyethylene) และ PP ชนิด homopolymer ดังแสดงในตารางที่ 5-6

ตารางที่ 5-6 สมบัติเชิงกล และค่า impact strength ของ WG/NRMA, HIPS, HDPE และ PP homopolymer

พอลิเมอร์	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Izod notched impact strength (J/cm)
WG/NRMA			
70/30	4.85	43.1	0.26
50/50	4.13	242.29	-
HIPS ¹	24	52	1.1
HDPE ²	32	900	1.6
PP (homopolymer) ³	33	150	0.7

หมายเหตุ ¹ ข้อมูลสมบัติเชิงกล (ค่า Tensile strength ที่รายงานในตารางคือค่า Tensile strength at break) และค่า impact strength ได้มาจาก

<http://www.westlakeplastics.com/product.php?c=CR&n=11>

² ข้อมูลสมบัติเชิงกล และค่า impact strength ได้มาจาก

http://www.wshampshire.com/pdf/psg_uhmw_polyethylene.pdf

³ ข้อมูลสมบัติเชิงกล และค่า impact strength ได้มาจาก

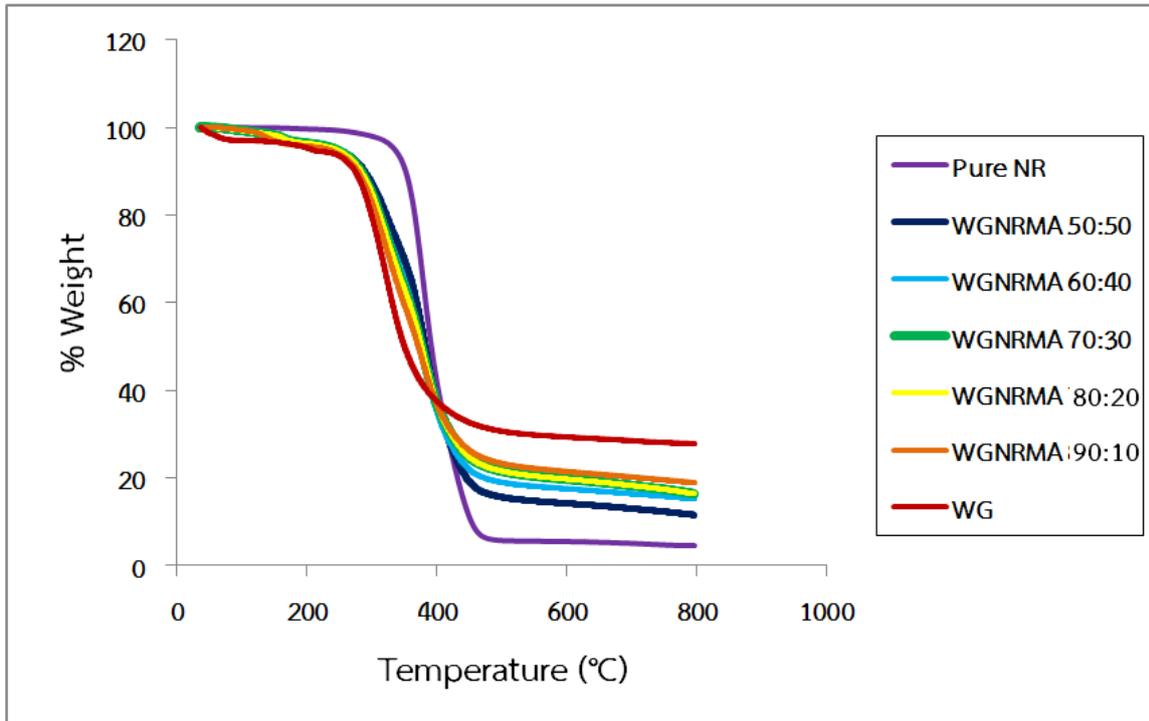
<http://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/PP.aspx>

จากตารางที่ 5-6 เมื่อเปรียบเทียบค่า tensile strength และค่า impact strength ของ WG/NRMA และพอลิเมอร์สังเคราะห์ HIPS, HDPE และ PP ชนิด homopolymer พบว่า tensile strength และค่า impact strength ของ WG/NRMA ต่ำกว่าอย่างน้อย 6 และ 2.7 เท่าตามลำดับเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิด ส่วนในกรณีของค่า elongation at break ของ WG/NRMA พบว่า WG/NRMA ที่

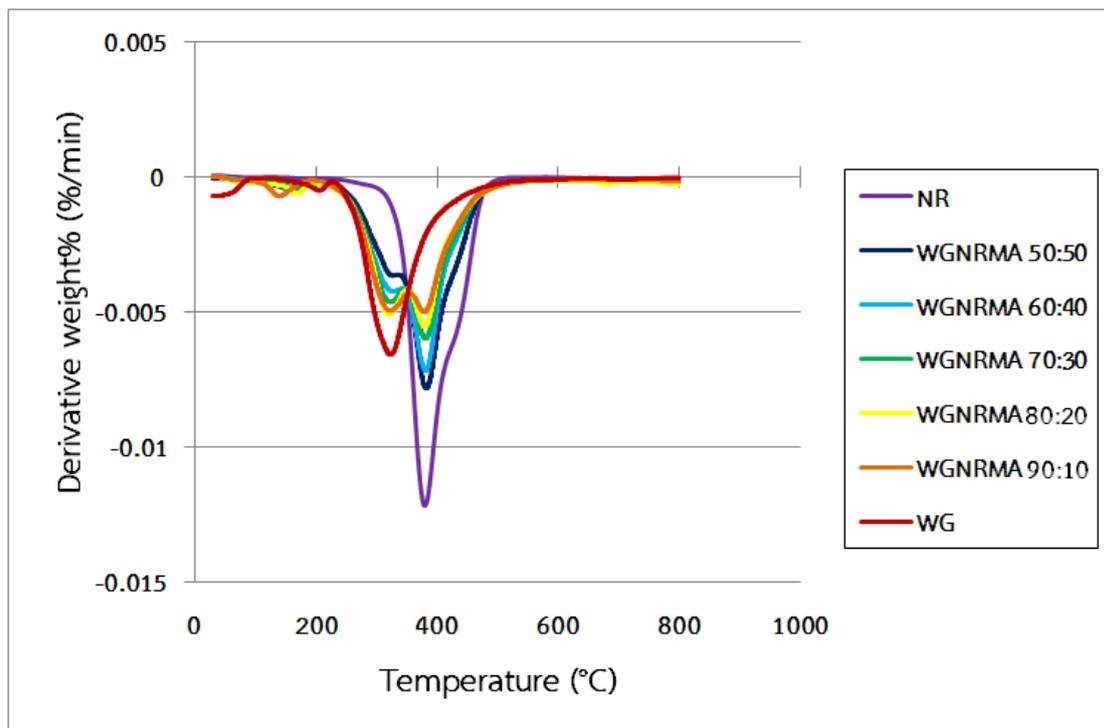
อัตราส่วน 50/50 มีค่า elongation at break ต่ำกว่า HDPE ถึง 3.7 เท่า อย่างไรก็ตาม WG/NRMA มีสมบัติการดึงยึดที่ดีกว่า HIPS และ PP homopolymer โดยพบว่าค่า elongation at break ของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 50/50 มีค่าสูงกว่า elongation at break ของ HIPS และ PP homopolymer ถึง 4.7 และ 1.6 เท่าตามลำดับ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบสมบัติสมบัติเชิงกล และค่า impact strength โดยรวมของ WG/NRMA มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ HIPS, HDPE และ PP ชนิด homopolymer อย่างไรก็ตาม WG/NRMA มีสมบัติการดึงยึดที่ดีกว่า HIPS และ PP homopolymer และ WG/NRMA เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ดีกว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิด

5.8 การศึกษาเสถียรทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA)

การทดสอบการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ทำโดยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 30 ถึง 800 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C /min TGA และ DTGA thermogram ของ WG, NR และ WG/NRMAS ที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 5-12 และ 5-13 ตามลำดับ และตารางที่ 5-7 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวที่ onset, inflection point และ end set ของ WG, NR, NRMA และพอลิเมอร์ผสม WG/NRMA ในกรณีของ WG พบมีการสลายตัวทางความร้อน 3 ขั้นตอน ขั้นแรกเกิดการสลายตัวทางความร้อนที่ inflection point ระหว่าง 75-95 °C เนื่องจากการสูญเสียโมเลกุลของน้ำ ขั้นที่สองเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ inflection point ระหว่าง 185-215 °C เนื่องจากการสลายตัวทางความร้อนของพันธะเพปไทด์ของกรดอะมิโน และขั้นที่สามเป็นการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ inflection point ระหว่าง 280-375 °C เกิดจากการสลายตัวของ WG ในส่วนที่เหลือที่เกิดจากการแตกออกของพันธะไดซัลไฟด์ (S-S) และ O-N ในโปรตีน [5] ส่วนยางธรรมชาติ (NR) จะมีอุณหภูมิการสลายตัวเพียง 1 ขั้นโดยมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ inflection point คือ 380.55 °C การที่อุณหภูมิในการสลายตัวของยางมีค่าสูงเนื่องมาจากสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางด้วยพันธะไดซัลไฟด์มีความแข็งแรง ในขณะที่ยาง NRMA จะพบอุณหภูมิการสลายตัว 2 ขั้น ขั้นแรกเกิดการสลายตัวทางความร้อนที่ inflection point ระหว่าง 133-176 °C ซึ่งเป็น การสลายตัวของหมู่แอนไฮไดรด์ที่กราฟที่อยู่บนสายโซ่ของยาง และขั้นที่สองเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ inflection point ระหว่าง 355-415 °C เนื่องมาจากการสลายตัวของสายโซ่หลักของยาง



รูปที่ 5-12 TGA thermogram ของชิ้นงานตัวอย่าง WG, WG/NRMA และ NR



รูปที่ 5-13 DTG ของชิ้นงานตัวอย่าง WG, WG/NRMA และ NR

เมื่อพิจารณาตารางที่ 5-7 ในกรณีของการสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน WG/NRMA ที่ทุกอัตราส่วนผสม พบว่าการสลายตัวในขั้นที่ 2 ซึ่งเป็นการสลายตัวของวัฏภาค WG มี Inflection point temperature ในช่วงอุณหภูมิ 318-330 °C ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิการสลายตัวขั้นที่ 3 ของตัวอย่าง pure WG ที่มี Inflection point temperature ที่อุณหภูมิ 323.7 °C ซึ่งอุณหภูมิการสลายตัวของวัฏภาค WG ในพอลิเมอร์ผสมมีการเปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิการสลายตัวของ WG บริสุทธิ์ ไม่เกิน 7 °C ดังนั้นการเติมยาง NRMA ลงใน WG ไม่ทำอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของวัฏภาค WG เปลี่ยนแปลงไปมากนักเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของ pure WG

ตารางที่ 5-7 ข้อมูลการสลายตัวทางความร้อนของ pure WG, NR, NRMA และ WG/NRMA

WG : NRMA	ขั้นการสลายตัวที่	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)		
		Onset	Inflection Point	End set
100 : 0	1	74.25	80.44	90.62
	2	186.58	211.25	214.30
	3	281.05	323.70	372.85
90 : 10	1	124.21	134.56	155.80
	2	278.03	323.05	337.36
	3	367.16	378.82	422.23
80 : 20	1	153.80	163.50	177.23
	2	281.89	318.40	332.31
	3	367.00	379.01	419.54
70 : 30	1	154.95	163.68	173.12
	2	280.72	324.65	333.55
	3	365.87	380.04	420.72
60 : 40	1	143.40	151.75	165.46
	2	281.90	330.30	312.41
	3	365.77	379.49	416.80
50 : 50	1	115.82	156.97	168.60
	2	283.56	319.32	317.46
	3	364.32	381.28	423.44
NRMA	1	133.10	160.22	176.87
	2	355.56	378.60	414.77
Pure NR	1	353.04	380.55	424.50

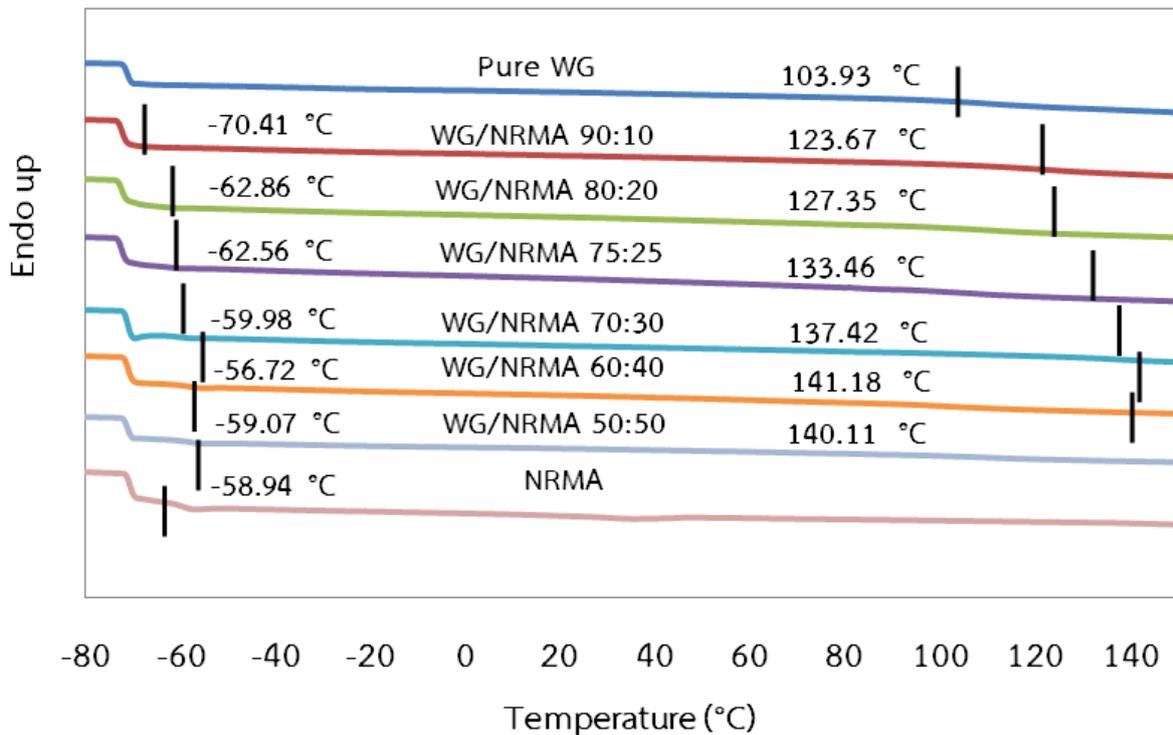
5.9 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimeter (DSC)

รูปที่ 5-14 และตารางที่ 5-8 แสดง DSC thermogram และค่า glass transition temperature (T_g) ของชิ้นงาน WG/NRMA ที่อัตราส่วนต่างๆ ตามลำดับ จากตารางที่ 5-7 เมื่อพิจารณาค่า T_g ที่ 2nd heat พบว่า pure WG มีค่า T_g อยู่ที่อุณหภูมิ 103 °C ส่วนยางที่ไม่ได้ผ่านการวัลคาไนซ์และผ่านการวัลคาไนซ์แล้วมีค่า T_g อยู่ที่ -67.53 และ -57.99 °C ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า WG มีค่า T_g ที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องอย่างมาก ส่วนยางมีค่า T_g ต่ำมาก ๆ ซึ่งเป็นการบ่งชี้ให้เห็นว่า WG เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเปราะ ในขณะที่ยางมีสมบัติที่มีความยืดหยุ่นสูง ในกรณีของยาง NRMA ที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์นั้น มีค่า T_g ที่สูงกว่ายางที่ไม่ได้ผ่านการวัลคาไนซ์ เนื่องมาจากยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์นั้น สายโซ่ของยางถูกเชื่อมขวางโดยซัลเฟอร์ จึงทำยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์มีการเคลื่อนที่ของสายโซ่ได้ยากกว่ายางที่ไม่ได้เกิดการเชื่อมขวาง จึงส่งผลให้ค่า T_g ของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์มีค่าสูงกว่า

เมื่อพิจารณาค่า T_g ของยางในพอลิเมอร์ผสมของกลูเตนกับยางที่มีการเชื่อมขวางด้วยระบบซัลเฟอร์ พบว่าค่า T_g ของวัสดุยางในพอลิเมอร์ผสมที่ทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่าค่า T_g ของยางที่มีการเชื่อมขวางด้วยระบบซัลเฟอร์ (-57.99 °C) แสดงว่าสายโซ่ของยางในพอลิเมอร์ผสมสามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายกว่ายางที่มีการเชื่อมขวาง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า T_g ของวัสดุยางในพอลิเมอร์ผสมและค่า T_g ของยางที่ไม่ได้เกิดการเชื่อมขวาง พบว่าค่า T_g ของวัสดุยางใน WG/NRMA มีค่าสูงกว่าค่า T_g ของยางที่ไม่ได้เกิดการเชื่อมขวาง จากข้อมูลเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าวัสดุยางในพอลิเมอร์ผสมเกิดการเชื่อมขวางกันบางส่วน หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ระดับการเชื่อมขวาง (crosslink density) ของยางในพอลิเมอร์ผสมน้อยกว่าในยาง NRMA ที่มีการเชื่อมขวาง การที่วัสดุยางในพอลิเมอร์ผสมเกิดการเชื่อมขวางกันได้บางส่วนอาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการผสม มีการเติมกลูเตนลงไปผสมกับยาง NRMA ก่อนเพื่อให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดกระจายตัวเข้าด้วยกัน จากนั้นจึงเติมสารเคมีที่ใช้ในการเชื่อมขวางยาง (curative agent) ลงไป สาร curative agent บางส่วนอาจเข้าไปกระจายตัวอยู่ในวัสดุของกลูเตน จึงทำให้มีปริมาณ curative agent ที่กระจายตัวลงในวัสดุของยางมีน้อยกว่าปกติ ส่งผลให้ยางเกิดการเชื่อมขวางในปริมาณที่ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นจึงทำให้สายโซ่ของยางสามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายเนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของยางน้อย ทำให้ T_g ของวัสดุยางในพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำกว่า T_g ของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว แต่ยังคงมี T_g สูงกว่ายางที่ไม่ผ่านการวัลคาไนซ์

เมื่อพิจารณาค่า T_g ของกลูเตนในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเชื่อมขวางด้วยระบบซัลเฟอร์ พบว่าค่า T_g ของกลูเตนในพอลิเมอร์ผสมที่ทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่า T_g ของ pure WG ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากวัสดุของ WG มีลักษณะเกาะรวมกลุ่มกันเป็นก้อนกระจายตัวอยู่ระหว่างวัสดุของยางที่เกิดการเชื่อมขวางกันบางส่วนในพอลิเมอร์ผสม (ดังแสดงให้เห็นในรูป SEM micrograph ในรูปที่ 5-10 และ 5-11) ทำให้วัสดุของกลูเตนเกิดการเคลื่อนไหวสายโซ่ได้ยากขึ้น ทำให้ค่า T_g ของกลูเตนในพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงกว่า T_g ใน pure WG จากตารางที่ 5-8 นี้จะสังเกตว่าในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยางอยู่น้อย (มีปริมาณ WG อยู่มาก) เช่นที่อัตราส่วน 90/10 และ 80/20 ค่า T_g ของวัสดุยางและค่า T_g ของวัสดุ WG ต่ำกว่ามาก (T_g ของวัสดุยางที่อัตราส่วน 90/10 และ 80/20 คือ -63.62 และ -62.35 °C ตามลำดับ และ T_g ของวัสดุ WG ที่อัตราส่วน 90/10 และ 80/20 คือ 123.67 และ 127.35 °C ตามลำดับ) เมื่อเทียบกับค่า T_g ของวัสดุยางและค่า T_g ของวัสดุ WG ในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยางอยู่มาก (มีปริมาณ WG อยู่น้อย) เช่นที่อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 (T_g ของวัสดุยางที่อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 คือ -63.62 และ -62.35 °C ตามลำดับ และ T_g ของวัสดุ WG ที่อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 คือ 141.18 และ 140.11 °C

ตามลำดับ) จากข้อมูลดังกล่าวนี้ บ่งชี้ให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยางอยู่น้อย วัฏภาคของยางเกิดการเชื่อมขวางได้น้อยกว่าในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยางอยู่มาก ทั้งนี้เนื่องจากในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยางอยู่น้อย ปริมาณสาร curative agent ที่เติมลงมีปริมาณน้อยเช่นกันตามสัดส่วนของวัฏภาคของยางในพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นปริมาณสาร curative agent ที่มีอยู่น้อยนี้ไม่สามารถกระจายตัวเข้าไปในวัฏภาคของยางได้ดีนัก เนื่องจากสาร curative agent มีโอกาสที่จะกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของ WG ได้มากกว่า ซึ่ง WG มีปริมาณมากในพอลิเมอร์ผสม จึงทำให้วัฏภาคของยางเกิดการเชื่อมขวางได้น้อยลง



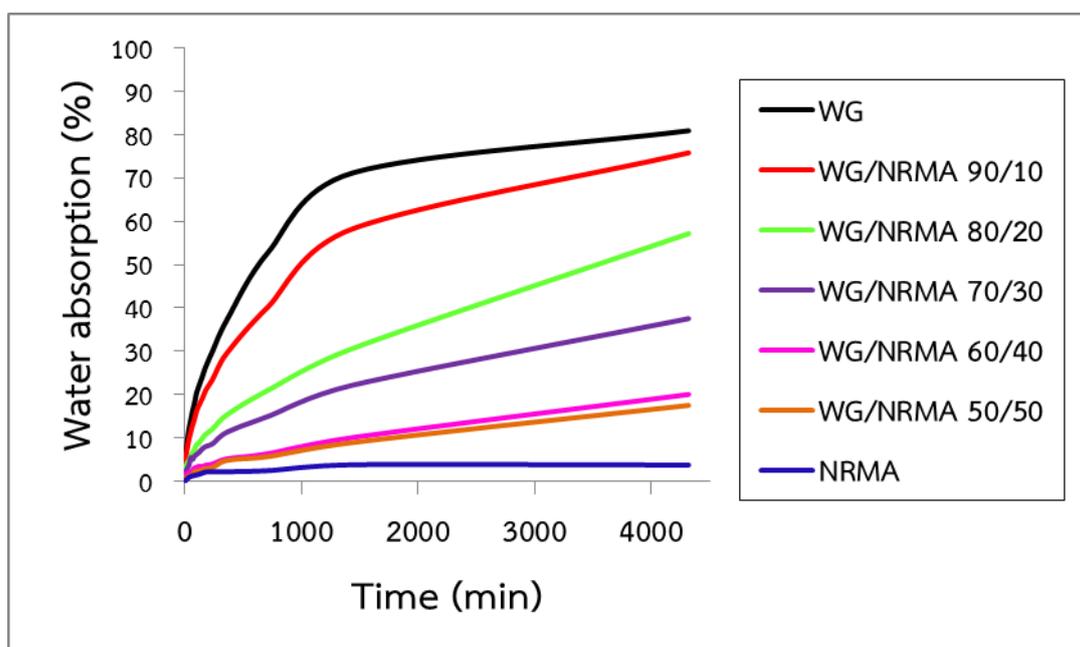
รูปที่ 5-14 DSC thermogram ของชิ้นงาน WG/NRMA (2nd heat)

ตารางที่ 5-8 ค่า Glass transition temperature (T_g) ของชิ้นงาน WG/NRMA

สารตัวอย่าง	T_g ที่ 1 st Heat (°C)			T_g ที่ 2 nd Heat (°C)		
	NRMA	WG		NRMA	WG	
WG	-	69.92	100.01	-	-	103.93
WG/NRMA_90:10	-63.04	-	155.57	-63.62	-	123.67
WG/NRMA_80:20	-63.52	94.12	-	-62.35	-	127.35
WG/NRMA_75:25	-62.62	94.35	-	-58.75	-	133.46
WG/NRMA_70:30	-62.05	94.39	142	-61.29	70.11	137.42
WG/NR/MA_60:40	-58.44	-	139.67	-58.51	-	141.18
WG/NRMA_50:50	-58.77	80.71	145.07	-56.80	64.38	140.11
NRMA (cured)	-58.45	-	-	-57.99	-	-
NRMA	-61.92	-	-	-67.53	-	-

5.10 การทดสอบความต้านทานต่อการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

งานวิจัยนี้ได้นำชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนและยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟท์ด้วยมาลิคแอนไฮไดรต์ในอัตราส่วนต่างๆ มาทดสอบความต้านทานต่อการดูดซึมน้ำ โดยการแช่ชิ้นงานในน้ำกลั่น จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่กำหนดรวมเป็นเวลา 3 วัน (4,320 นาที) แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็น %การดูดซึมน้ำ (%WA) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5-15 และตารางที่ 5-9 แสดงค่า %การดูดซึมน้ำของ WG พอลิเมอร์ผสม WG/NRMA ที่อัตราส่วนต่างๆ และ NRMA



รูปที่ 5-15 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมได้จากกลูเตนและยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟท์ด้วยมาลิคแอนไฮไดรต์ (WG/NRMA) ในอัตราส่วนต่าง ๆ

ตารางที่ 5-9 % การดูดซึมน้ำ (WA) ของ WG พอลิเมอร์ผสม WG/NRMA ที่อัตราส่วนต่างๆ และ NRMA ที่ การทดสอบ 4,320 นาที (หรือ 3 วัน)

สารตัวอย่าง	% การดูดซึมน้ำ (%WA)
WG	80.88
WG/NRMA (90:10)	75.78
WG/NRMA (80:20)	57.15
WG/NRMA (75:25)	45.58
WG/NRMA (70:30)	37.57
WG/NR/MA (60:40)	20.06
WG/NRMA (50:50)	17.55
NRMA (cured)	3.78

จากรูปที่ 5-15 และตารางที่ 5-9 พบว่า WG มี %การดูดซึมน้ำ (%WA) ที่สูงกว่ากับชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม WG/NRMA ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบ %WA ที่เวลาการทดสอบ 3 วัน ของชิ้นงาน WG ซึ่งมี %WA เท่ากับ 80.88% กับ พอลิเมอร์ผสม WG/NRMA ที่มีปริมาณยางอยู่ 10 และ 50% โดยน้ำหนัก ซึ่งมี %WA เท่ากับ 75.78 และ 17.55% ตามลำดับ พบว่าพอลิเมอร์ผสม WG/NRMA ที่มีปริมาณยางอยู่ 10 และ 50% โดยน้ำหนัก มี %WA ลดลงถึง 1.1 และ 4.6 เท่าตามลำดับ เมื่อเทียบกับ %WA ของ WG เนื่องจากโครงสร้างของกลูเตนประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายชนิดที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วเป็นจำนวนมาก [14] กลูเตนจึงสามารถดูดซึมน้ำได้มาก ส่วนยาง NRMA มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนซึ่งไม่มีขั้ว แม้ว่าในโครงสร้างของ NRMA จะมีหมู่ MA ซึ่งมีความเป็นขั้วสูงและสามารถดูดซึมน้ำได้ดี แต่ปริมาณ MA ที่กราฟที่อยู่บนสายโซ่ของยางมีปริมาณน้อยมาก (1.78%) จึงทำให้ชิ้นงาน NRMA มีการดูดซึมน้ำได้น้อย ดังนั้นการเติมยาง NRMA ลงใน WG จะช่วยลดการดูดซึมน้ำใน WG ได้

นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วง 1,000 นาทีแรกของการทดสอบ ชิ้นงาน WG และ WG/NRMA ที่ทุกอัตราส่วนจะมีอัตราการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้นมาก และหลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 1,000 นาที ชิ้นงานเริ่มจะมีอัตราการดูดซึมน้ำที่ต่ำลง เมื่อเทียบกับในช่วงแรก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมได้น้อยลง

ในกรณีของพอลิเมอร์ผสม %WA ของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนของ WG ในปริมาณที่มาก เช่นที่อัตราส่วน 90:10 จะมี %การดูดซึมน้ำที่มากกว่าในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ WG อยู่่น้อย เช่นที่อัตราส่วน 50:50 ดังนั้นชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนของยาง NRMA ในปริมาณที่มากขึ้น จะมี %การดูดซึมน้ำที่ลดต่ำลง โดย %WA ของพอลิเมอร์ผสมที่มียางอยู่ 10% ลดลงจาก 75.78% เป็น 17.55% ในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยาง 50% ดังนั้นการเพิ่มปริมาณยาง NRMA ในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น จะช่วยส่งเสริมการต้านทานต่อการดูดซึมน้ำของ WG ได้ดียิ่งขึ้น

6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการดัดแปรโครงสร้างของยางธรรมชาติ (NR) ด้วยการกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ (MA) ลงไปในยาง NR เพื่อเพิ่มความมีขั้วให้กับยาง NR การดัดแปรยางธรรมชาติทำโดยการผสมยาง NR และ MA ลงใน internal mixer ภายใต้สภาวะที่มีแรงเฉือนที่อุณหภูมิ 120 °C โดยไม่ต้องมีการใช้ initiator พบว่า ปริมาณของ MA ที่ถูกกราฟท์ลงบนสายโซ่ของยาง NR คือ 1.78% โดยน้ำหนัก

ยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (NRMA) นี้จะนำมาผสมกับกลูเตนจากแป้งสาลี (WG) เพื่อเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสม WG/NRMA จากผลการศึกษาลักษณะของพอลิเมอร์ผสม WG/NRMA และ WG/NR พบว่ายาง NRMA มีความเข้ากันได้กับ WG มากกว่ายาง NR เนื่องจาก MA ที่อยู่บนสายโซ่ของยางจะเพิ่มความเป็นขั้วให้กับยาง NRMA มากขึ้นทำให้สามารถเข้ากันได้กับ WG ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้ว

จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก และความสามารถในการต้านทานการดูดซึมน้ำของ WG และ พอลิเมอร์ผสม WG/NRMA พบว่า WG/NRMA ที่มีปริมาณยางอยู่ 10 และ 30% โดยน้ำหนัก มีค่า impact strength ที่สูงกว่า WG ถึง 2.8 และ 16.0 เท่าตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า WG/NRMA ที่มีปริมาณยางอยู่ 10 และ 50% โดยน้ำหนัก มีค่า %การดูดซึมน้ำ (%WA) ลดลง 1 และ 4.6 เท่าตามลำดับ เมื่อเทียบกับ %การดูดซึมน้ำของ WG ดังนั้นการเติมยาง NRMA ลงใน WG ช่วยส่งเสริมความต้านทานต่อแรงกระแทก และลดการดูดซึมน้ำของ WG

ปริมาณยาง NRMA ในพอลิเมอร์ผสมส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก และการต้านทานการดูดซึมน้ำ กล่าวคือ เมื่อปริมาณยาง NRMA ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 50% จะส่งผลให้ค่า modulus ลดลงอย่างมากถึง 167 เท่า และค่า tensile strength ลดลงเพียงเล็กน้อยคือ 1.25 เท่า ในขณะที่ เมื่อปริมาณยาง NRMA ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 50% จะทำให้ค่า elongation สูงขึ้นถึง 83 เท่า และค่า impact strength ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมยาง 30% สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมยาง 10% ถึง 5.7เท่า สำหรับการต้านทานการดูดซึมน้ำนั้น พบว่าค่า %การดูดซึมน้ำ (%WA) ของพอลิเมอร์ผสม WG/NRMA ลดลงอย่างมากเมื่อปริมาณยาง NRMA ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น โดย %WA ของพอลิเมอร์ผสมที่มียางอยู่ 10% ลดลงจาก 75.78% เป็น 17.55% ในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยาง 50% ดังนั้นการเพิ่มปริมาณยาง NRMA ในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น จะช่วยส่งเสริมความสามารถในการดัดยัด ความต้านทานต่อแรงกระแทก และการต้านทานต่อการดูดซึมน้ำของ WG ได้ดียิ่งขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่า tensile strength และค่า impact strength ของ WG/NRMA และพอลิเมอร์สังเคราะห์ HIPS, HDPE และ PP ชนิด homopolymer พบว่า tensile strength และค่า impact strength ของ WG/NRMA ต่ำกว่าอย่างน้อย 6 และ 2.7 เท่าตามลำดับเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิด ในกรณีของค่า elongation at break ของ WG/NRMA พบว่า WG/NRMA ที่อัตราส่วน 50/50 มีค่า elongation at break ต่ำกว่า HDPE ถึง 3.7 เท่า อย่างไรก็ตาม WG/NRMA มีสมบัติการดัดยัดที่ดีกว่า HIPS และ PP homopolymer โดยพบว่าค่า elongation at break ของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 50/50 มีค่าสูงกว่า elongation at break ของ HIPS และ PP homopolymer ถึง 4.7 และ 1.6 เท่าตามลำดับ

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการ compound ยางด้วยกำมะถันซึ่งเป็นตัวเชื่อมขวางยางก่อนนำไปผสมกับ WG เพื่อให้กำมะถันกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคยาง เป็นการเพิ่มระดับการเกิดเชื่อมขวางในยางให้มากขึ้น ซึ่งน่าจะส่งเสริมให้ค่า modulus และ tensile strength ของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น

2. จากผลของ SEM จะพบว่าวัฏภาคของ WG เกาะรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่อยู่ในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งส่งผลให้การสมบัติเชิงกล เช่น modulus และ tensile strength ของพอลิเมอร์ผสมไม่สูงมากนัก ดังนั้นอาจต้องมีการใช้ plasticizer เช่น glycerol หรือ polyethylene glycol มาผสมกับ WG ก่อน เพื่อให้ WG กระจายตัวได้ดีขึ้นในยาง ซึ่งอาจช่วยปรับปรุงให้ค่า modulus และ tensile strength ของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงใน WG ไม่ควรมากเกินไป เนื่องจากอาจจะไปลดความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมได้

3. จากการทดลองพบว่าปริมาณ MA ที่กราฟท์ลงบนยางมีปริมาณน้อยมาก คือ 1.782% เท่านั้น แม้ว่าจะใช้ MA ที่เข้าทำปฏิกิริยาถึง 20 phr ดังนั้นอาจต้องทำการกราฟท์ MA ลงบนสายโซ่ของยางโดยใช้ตัวทำละลายยางเพื่อให้อยู่รูปของเหลวก่อน หรืออาจจะทำการกราฟท์ MA ใน latex rubber แล้วทำการตกตะกอนยางเพื่อนำมาผสมกับ WG ซึ่งวิธีการกราฟท์ MA บนยางเหล่านี้ น่าจะทำให้ได้ปริมาณ MA ที่กราฟท์ลงบนยางสูงขึ้น ซึ่งจะช่วยส่งเสริมให้ยางและ WG เกิดปฏิกิริยากันได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดความเข้ากันได้มากขึ้น

4. ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระบบวัลคาไนซ์เซชันในวัฏภาคของยางแบบ Conventional Vulcanization (CV) โดยมีการเชื่อมขวางบางส่วนเป็น Polysulfide bond ซึ่งการเชื่อมขวางยางแบบ CV นี้จะทำให้ยางมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ไม่สูงนัก ดังนั้นถ้าต้องการให้วัฏภาคยางในพอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้นอาจเลือกใช้ระบบวัลคาไนซ์เซชันแบบอื่น เช่น Peroxide Vulcanization เมื่อยางมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงอาจส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจจะนำพอลิเมอร์ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวางขึ้น

บรรณานุกรม

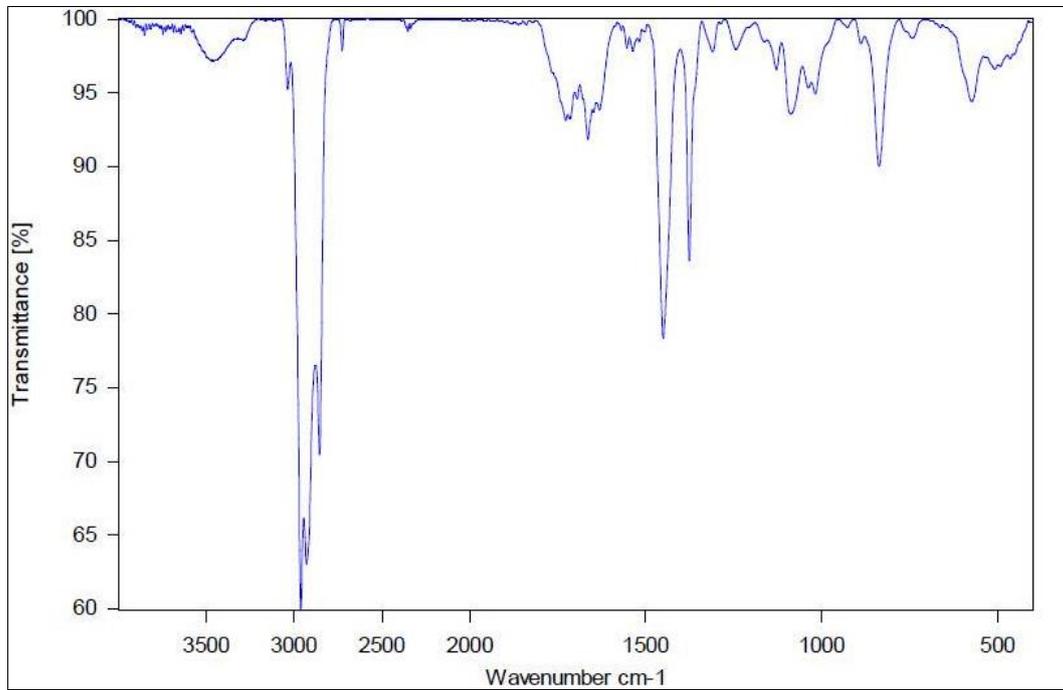
- [1] A. Redl, M.H. Morel, J. Bonicel, B. Vergnes, S. Guilbert, “Extrusion of wheat gluten plasticized with glycerol: influence of process conditions on flow behavior, rheological properties, and molecular size distribution”, *Cereal Chemistry*, 1999, 76 (3), 361–370
- [2] J. Gueguen, Y. Popineau, “In: Plant proteins from European crops: food and nonfood applications”, Berlin: Springer-Verlag, 1998
- [3] G. Cherian, A. Gennadios, C. Weller, P. Chinachoti, “Thermomechanical behavior of wheat gluten films: effect of sucrose, glycerin, and sorbitol”, *Cereal Chemistry*, 1995, 72 (1), 1–6
- [4] J. Irissin-Mangata, G. Bauduin, B. Boutevin, N. Gontard, “New plasticizers for wheat gluten films”, *European Polymer Journal*, 2001, 37(8), 1533–1541
- [5] M. Pommet, A. Redl, M.H. Morel, S. Guilbert, “Study of wheat gluten plasticization with fatty acids”, *Polymer*, 2003, 44 (1), 115–122
- [6] L. Day, M.A. Augustin, I.L. Batey, C.W. Wrigley, “Wheat gluten uses and industry needs”, *Trends in Food Science & Technology*, 2006, 17, 82-90.
- [7] ข้าวสาลี [ออนไลน์], วันที่สืบค้น 15 สิงหาคม 2555,
<http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK17/chapter10/chap10.htm>
- [8] เมล็ดข้าวสาลี [ออนไลน์], วันที่สืบค้น 15 สิงหาคม 2555,
<http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%82%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%A7%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A5%E0%B8%B5>.
- [9] ข้าวสาลี [ออนไลน์], วันที่สืบค้น 15 สิงหาคม 2555,
<http://www.foodnetworksolution.com/vocab/word/1277/%E0%B8%82%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%A7%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A5%E0%B8%B5>
- [10] Wheat [ออนไลน์], วันที่สืบค้น 15 สิงหาคม 2555, <http://befitfearlessyou.blogspot.com>
- [11] Beyond Wheat, Rice and Corn–Less Popular but Healthy Grain [ออนไลน์], วันที่สืบค้น 15 สิงหาคม 2555, <http://www.sweetadditions.net/food-drinks/beyond-wheat-rice-and-corn-less-popular-but-healthy-grain>
- [12] A kernel of wheat [ออนไลน์], วันที่สืบค้น 15 สิงหาคม 2555,
<http://www.mainebread.com/kids.html>
- [13] แป้งสาลี [ออนไลน์], วันที่สืบค้น 15 สิงหาคม 2555,
<http://www.foodnetworksolution.com/vocab/word/1378/wheatflour%E0%B9%81%E0%B8%9B%E0%B9%89%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A5%E0%B8%B5>

- [14] ไกลโคโปรตีน [ออนไลน์], วันที่สืบค้น 15 สิงหาคม 2555,
<http://www.foodnetworksolution.com/vocab/word/1378/wheat-flour%E0%B9%81%E0%B8%9B%E0%B9%89%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A5%E0%B8%B5>
- [15] C. Branden, J. Tooze, "Introduction to Protein Structure", 2nd Ed. Garland Publishing, 1991
- [16] B. Lagrain, B.G. Thewissen, K. Brijs, J.A. Delcour, "Mechanism of gliadin-glutenin cross-linking during hydrothermal treatment", *Food Chemistry*, 2008, 107, 753-760
- [17] B. Lagrain, B. Goderis, K. Brijs, J.A. Delcour, "Molecular basis of processing wheat gluten toward biobased materials", *Biomacromolecules*, 2010, 11, 533-541
- [18] R.M. Dicharry, P. Ye, G. Saha, E. Waxman, A.D. Asande, R.S. Parnas, "Wheat gluten-thiolated poly(vinyl alcohol) blends with improved mechanical properties", *Biomacromolecules*, 2006, 7, 2837-2844
- [19] ยางธรรมชาติ [ออนไลน์], วันที่สืบค้น 15 สิงหาคม 2555,
http://www.electron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com_content&task=view&id=141&Itemid=0
- [20] พงษ์ธร แซ่อู๋, "สารเคมียาง", พิมพ์ครั้งที่ 2. ปทุมธานี: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), 2550
- [21] Z. Zeng, W. Ren, C. Xu, W. Lu, Y. Zhang, Y. Zhang, "Maleated natural rubber prepared through mechanochemistry and its coupling effects on natural rubber/cotton fiber composites", *Journal of Polymer Research*, 2010, 17, 213-219
- [22] C. Nakason, S. Saiwaree, S. Tatun, A. Kaesaman, "Rheological, thermal and morphological properties of maleated natural rubber and its reactive blending with poly(methyl methacrylate)", *Polymer Testing*, 2006, 25, 656-667
- [23] J. John, J. Tang, M. Bhattacharya, "Processing of biodegradable blends of wheat gluten and modified polycaprolactone", *Polymer*, 1998, 39, 2883-2895
- [24] V.L. Finkenstadt, A.A. Mohamed, G. Biresaw, J.L. Willett, "Mechanical Properties of Green Composites with Polycaprolactone and Wheat Gluten", *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, 110, P. 2218-2226
- [25] A.A. Mohamed, V.L. Finkenstadt, S.H. Gordon, D.E. Palmquist, "Thermal and Mechanical Properties of Compression-Molded pMDI-Reinforced PCL/Gluten Composites", *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 118, P. 2778-2790
- [26] A.A. Mohamed, S.H. Gordon, C.J. Carriere, S. Kim, "Thermal characteristics of polylactic acid/wheat gluten blends", *Journal of Food Quality*, 2006, 29, 266-281

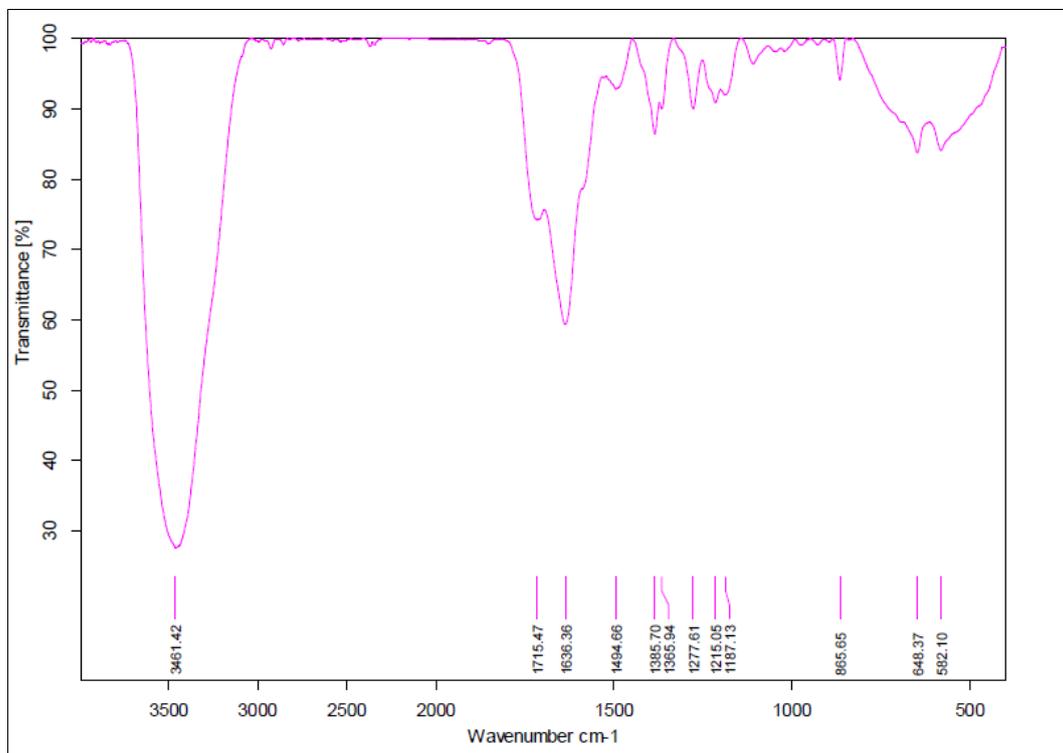
- [27] S.W. Lim, I.K. Jung, K.H. Lee, B.S. Jin, "Structure and properties of biodegradable gluten/aliphatic polyester blends", *European Polymer Journal*, 1999, 35, 1875-1881
- [28] X. Zhang, I. Burgar, E. Loubakos, H. Beh, "The mechanical property and phase structures of wheat proteins/polyvinyl alcohol blends studied by high-resolution solid-state NMR", *Polymer*, 2004, 45, 3305-3312
- [29] L. Jong, "Viscoelastic properties of rubber composites reinforced by wheat gluten and wheat starch co-filler", *Polymer Materials: Science and Engineering*, 2009, 100, 342-343
- [30] S.C. Peterson, "Vital wheat gluten as a filler for rubber compounds: Effects of pH and homogenization on the reinforcement properties", The 236th ACS National Meeting, Philadelphia, PA, August 17-21, 2008, ACS poster abstract no. AGFD 177
- [31] S.C. Peterson, L. Jong, "Effect of shearing on the reinforcement properties of vital wheat gluten", *Journal of Elastomers and Plastics*, 2011, 43, 207-220
- [32] S.C. Peterson, L. Jong, "Effect of wheat flour pre-cooking on the composite modulus of wheat flour and carboxylated styrene-butadiene latex", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Composites*, 2008, 39, 1909-1914
- [33] I. Franta, "Elastomers and rubber compounding materials", *Polymer Science* 1, 1989, 117-118

ภาคผนวก ก

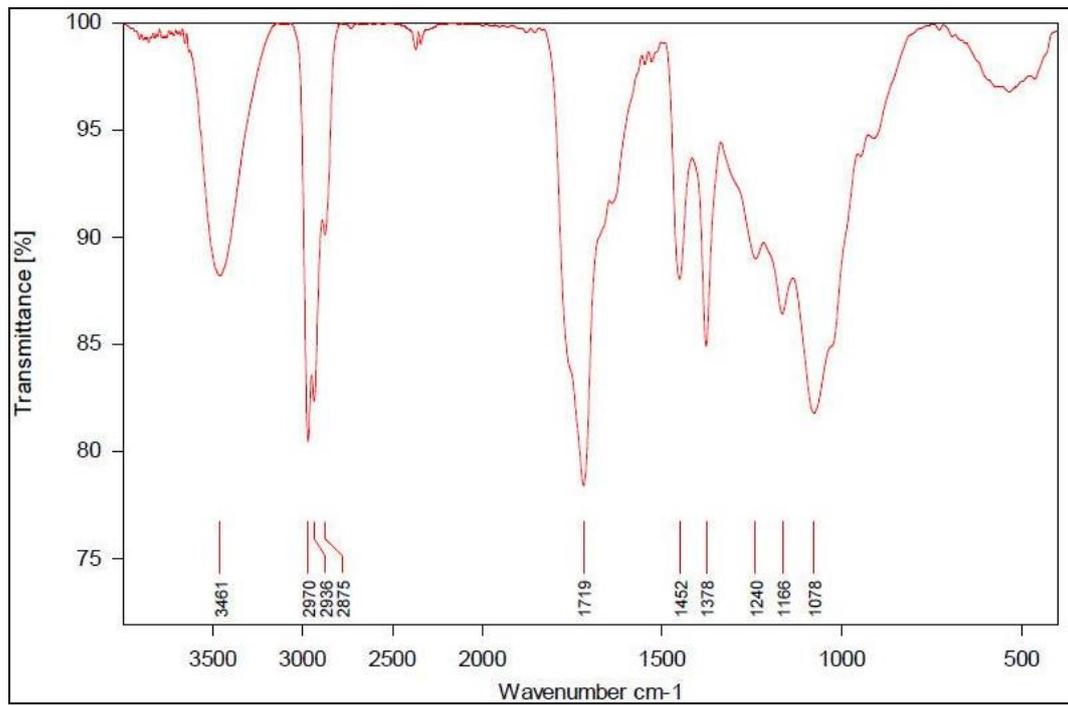
ผลการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR



รูปที่ ก-1 FTIR spectrum ของ NR

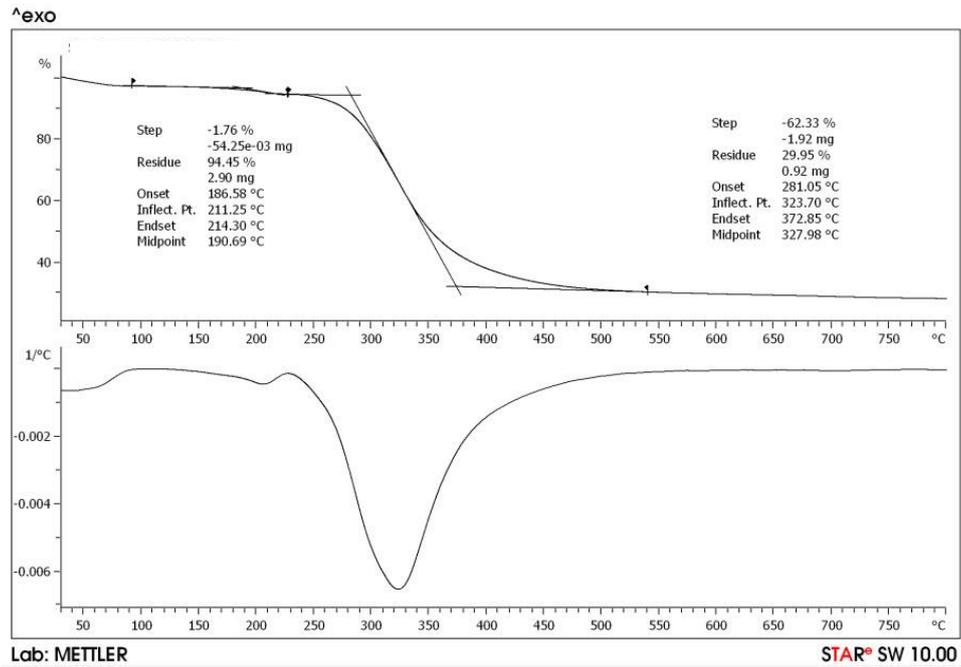


รูปที่ ก-2 FTIR spectrum ของ MA

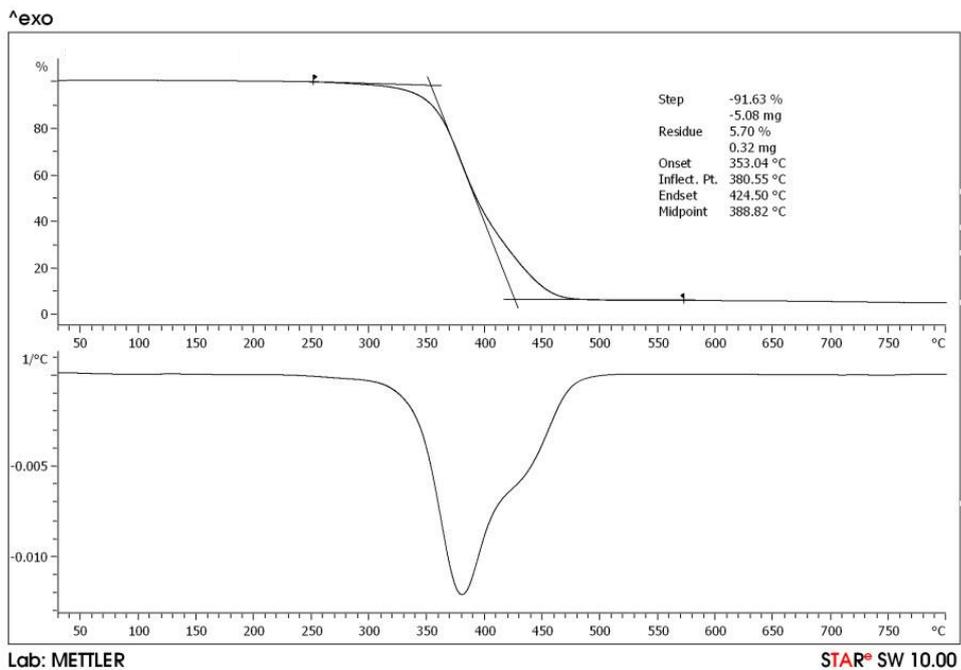


รูปที่ ก-3 FTIR spectrum ของ NRMA ที่เติม MA ปริมาณ 20phr

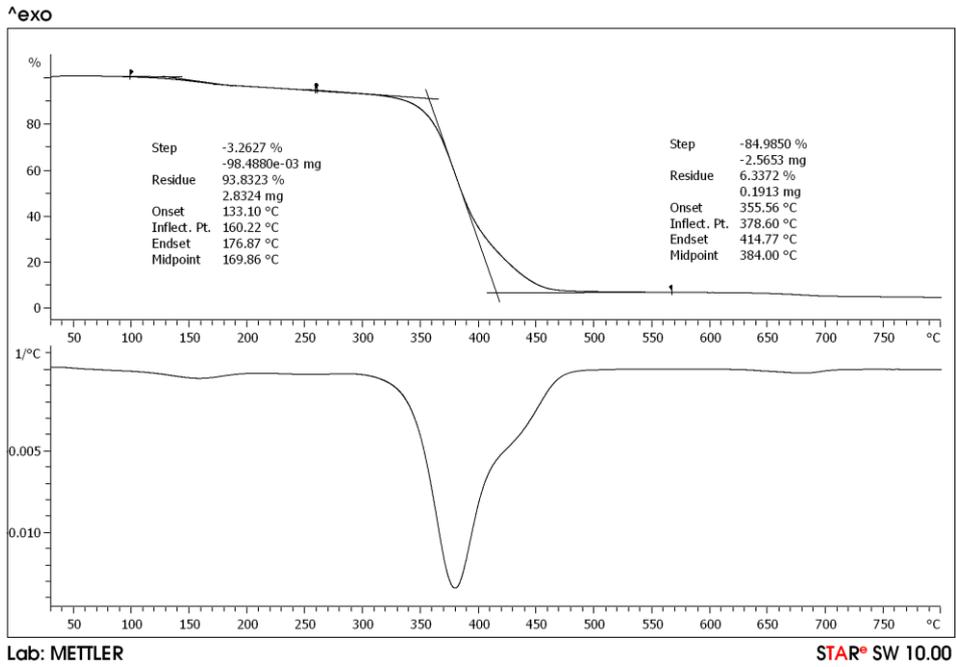
ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบความเสถียรทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



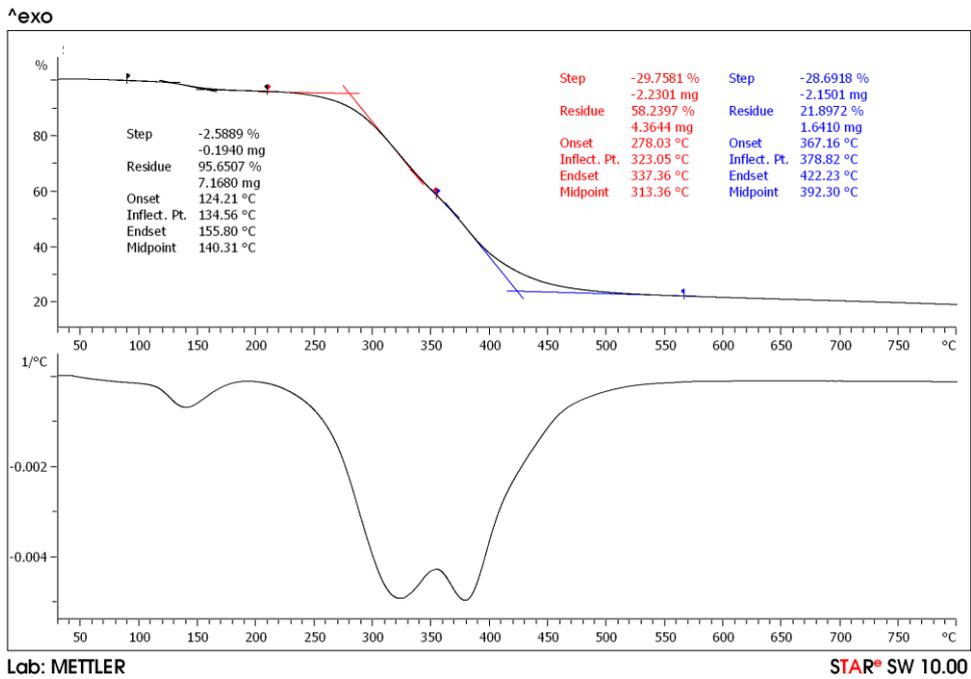
รูปที่ ข-1 TGA thermogram และ DTG ของ WG



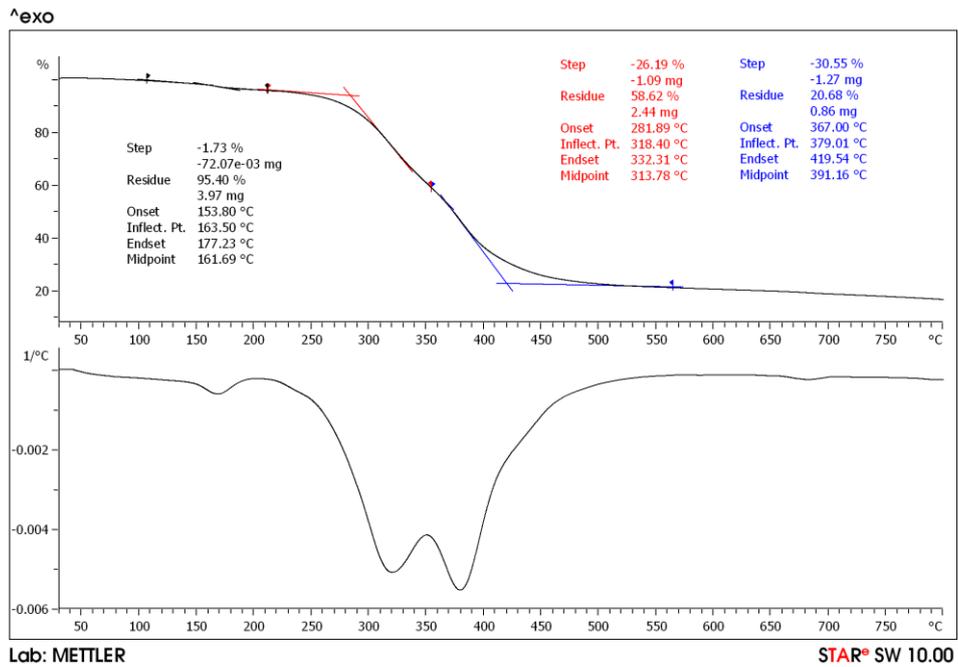
รูปที่ ข-2 TGA thermogram และ DTG ของ NR



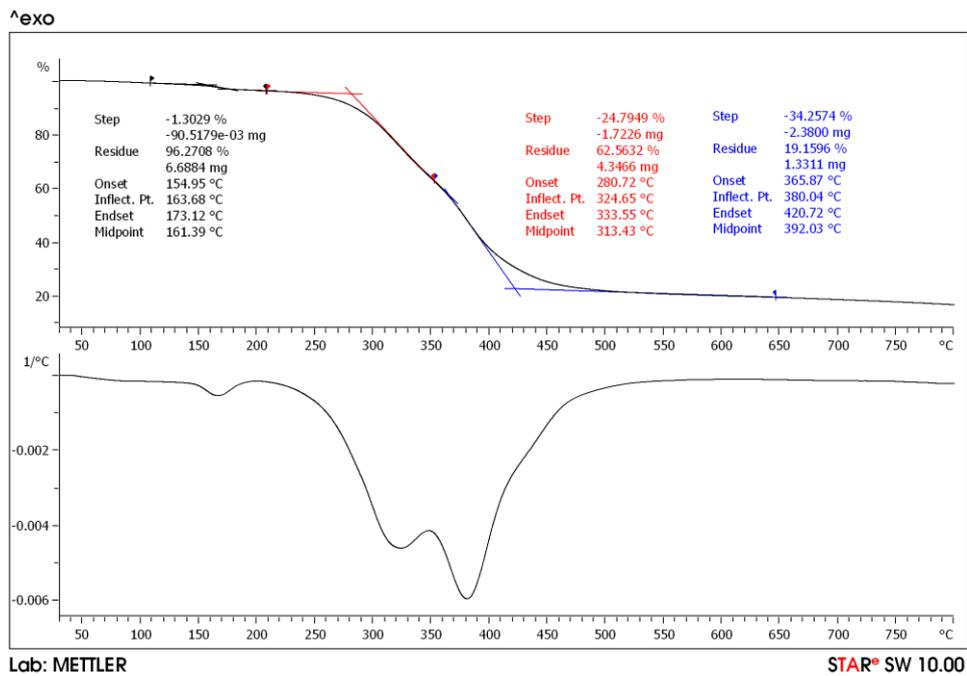
รูปที่ ข-3 TGA thermogram และ DTG ของ NRMA



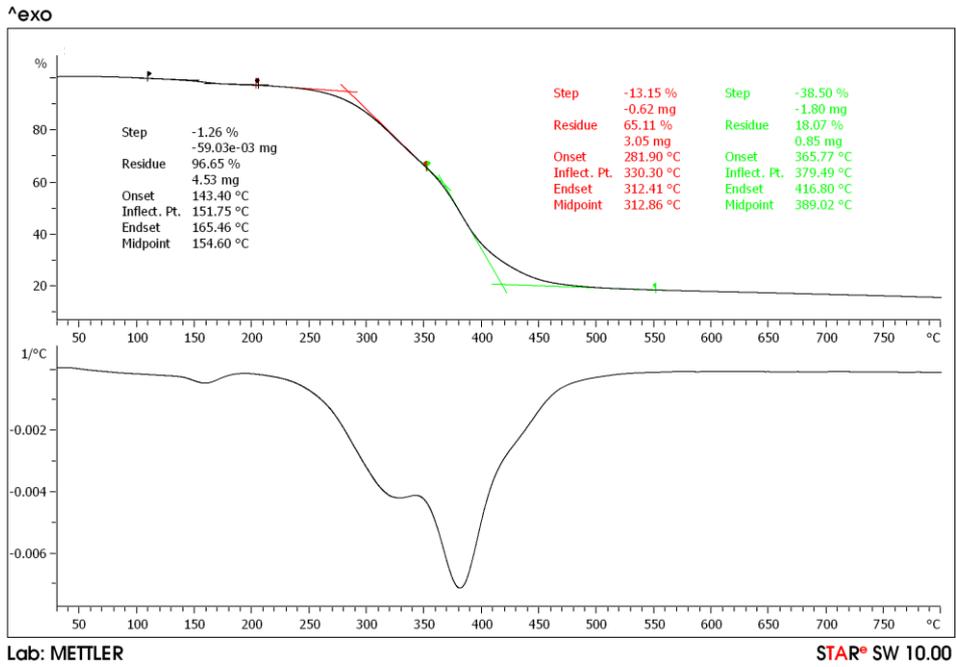
รูปที่ ข-4 TGA thermogram และ DTG ของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 90:10



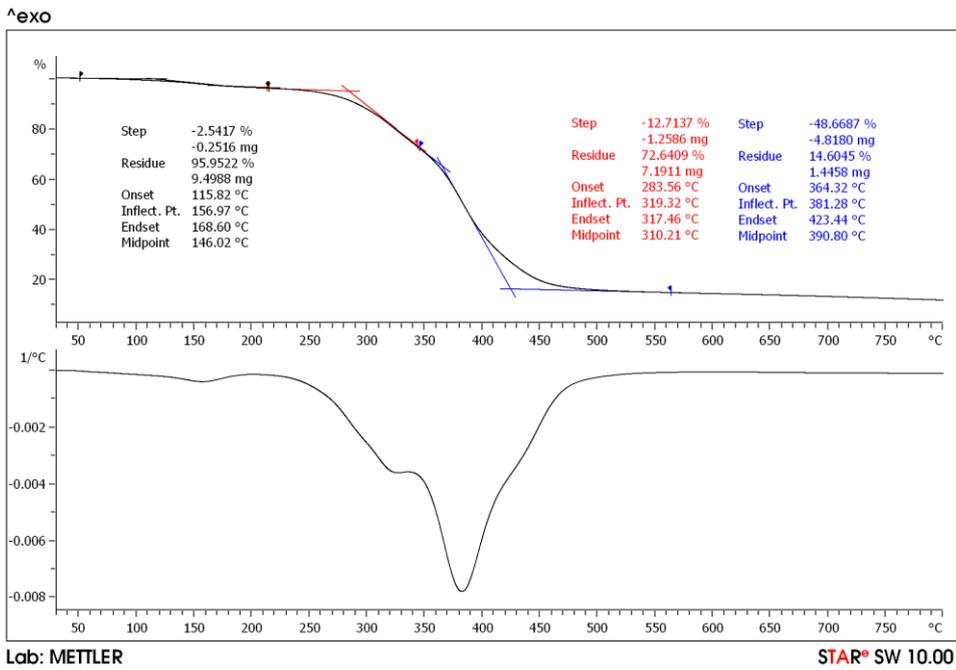
รูปที่ ข-5 TGA thermogram และ DTG ของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 80:20



รูปที่ ข-6 TGA thermogram และ DTG ของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 70:30



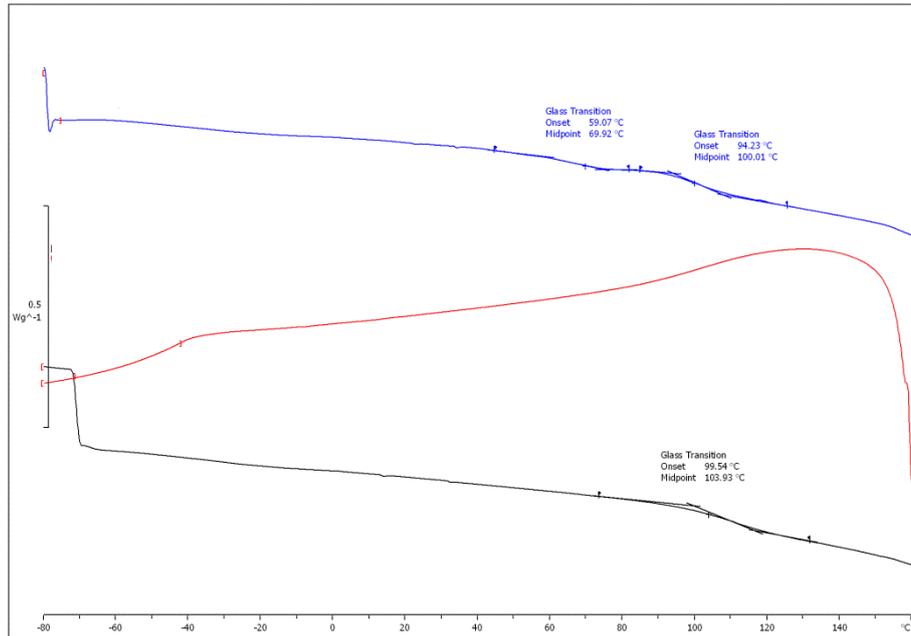
รูปที่ ข-7 TGA thermogram และ DTG ของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 60:40



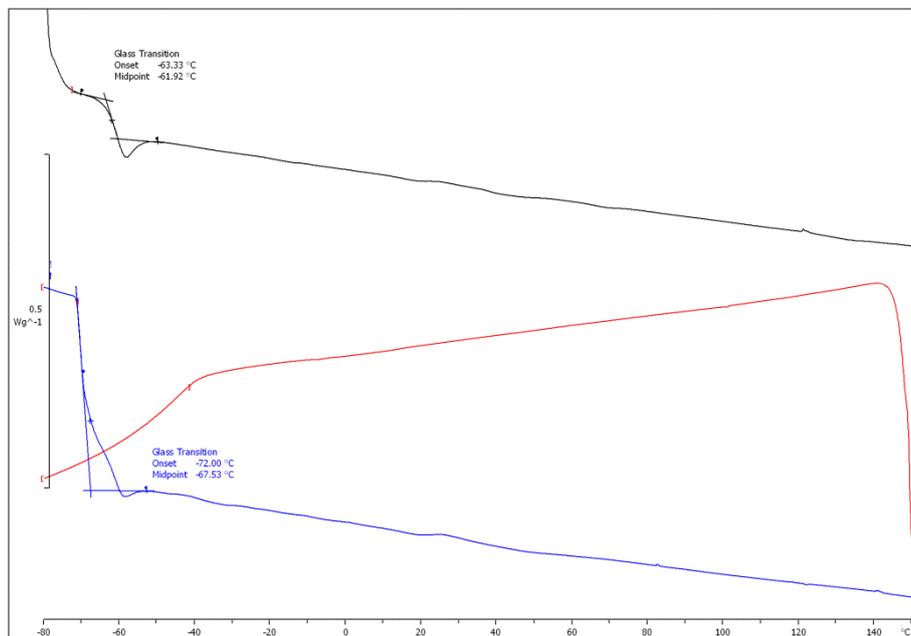
รูปที่ ข-8 TGA thermogram และ DTG ของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 50:50

ภาคผนวก ค

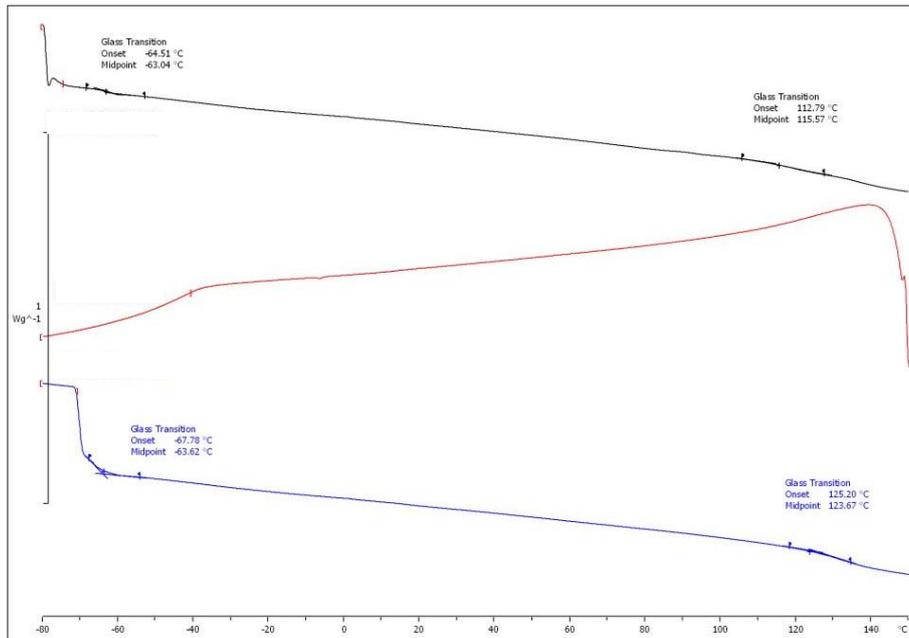
ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



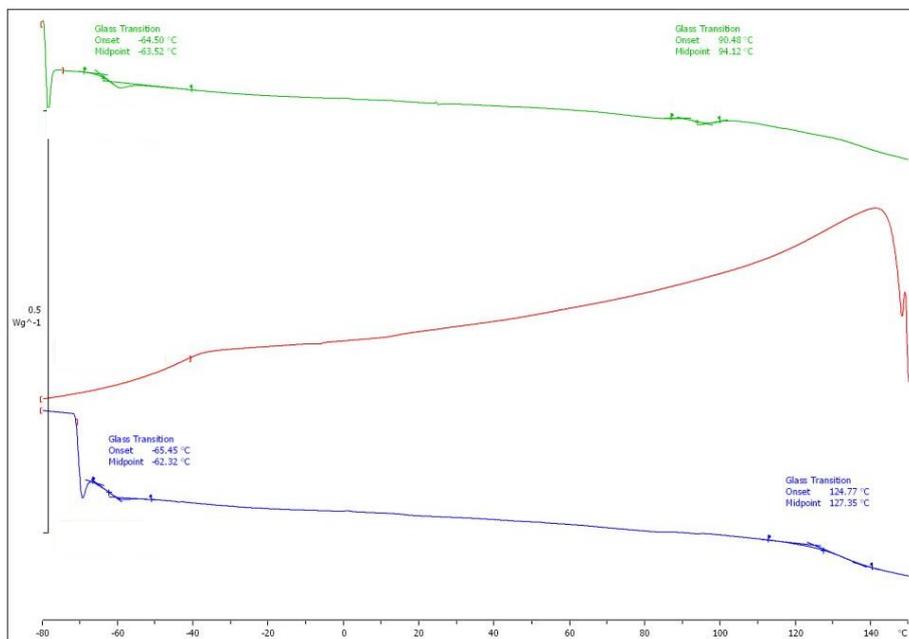
รูปที่ ค-1 DSC thermogram ของ WG



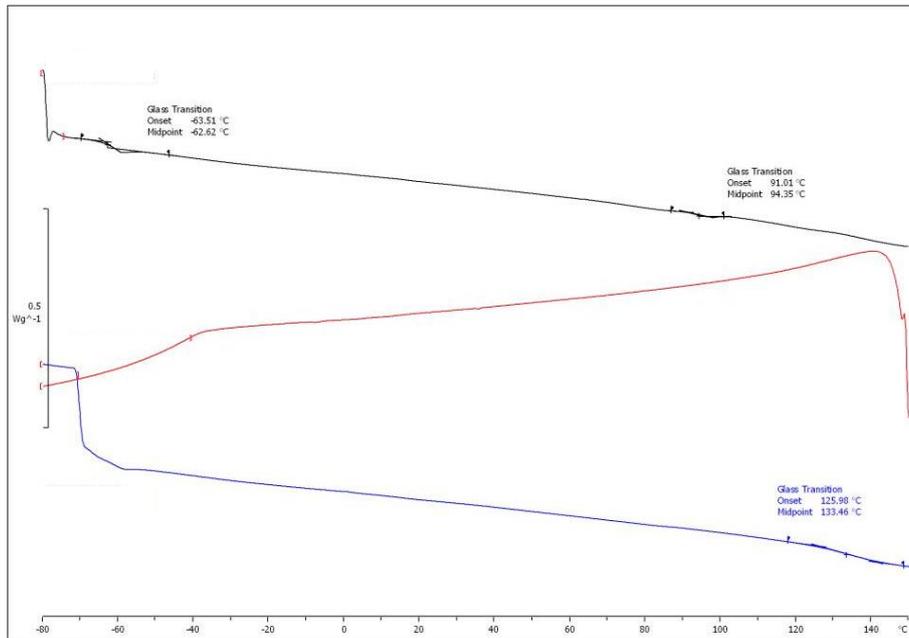
รูปที่ ค-2 DSC thermogram ของ NRMA



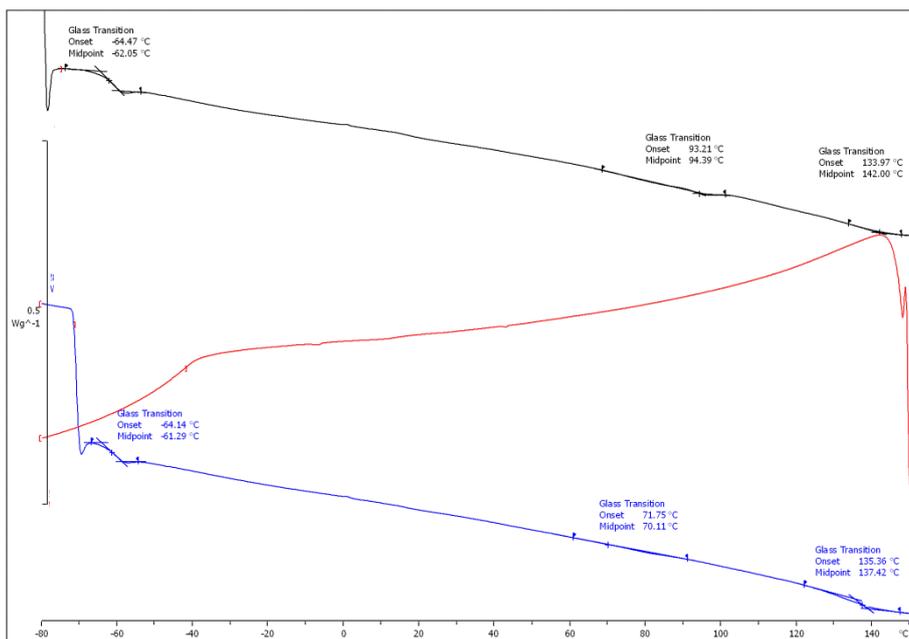
รูปที่ ค-3 DSC thermogram ของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 90:10



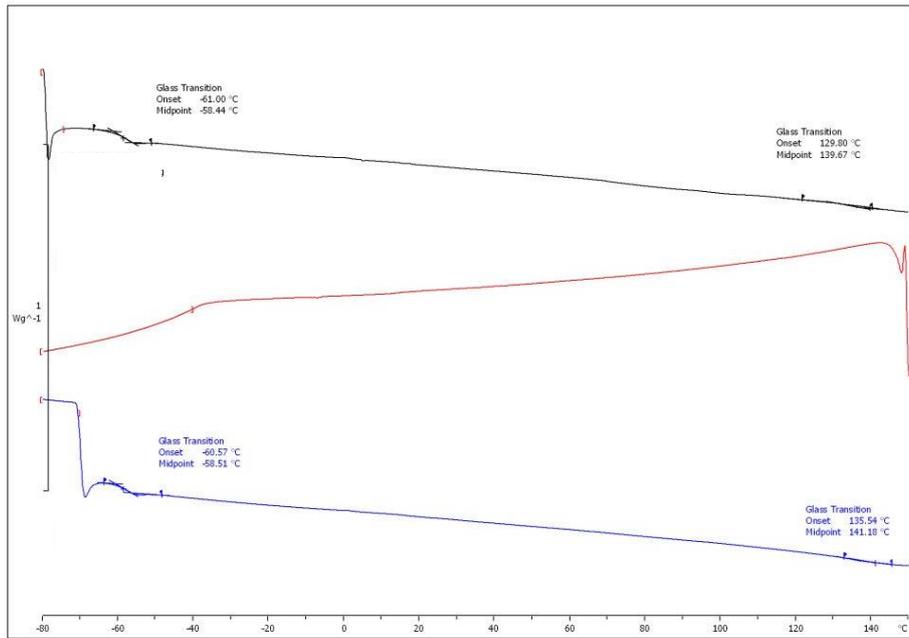
รูปที่ ค-4 DSC thermogram ของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 80:20



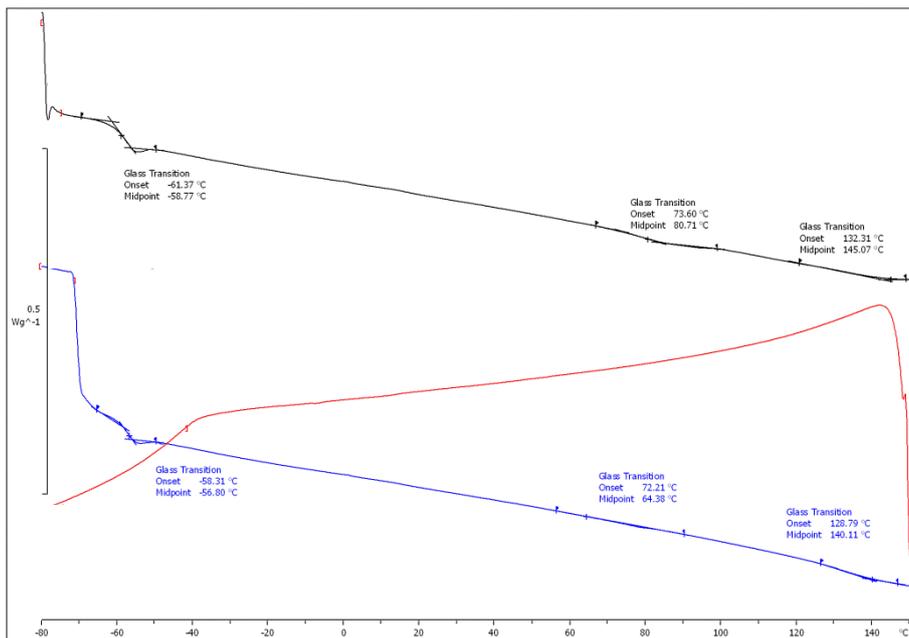
รูปที่ ค-5 DSC thermogram ของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 75:25



รูปที่ ค-6 DSC thermogram ของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 70:30



รูปที่ ค-7 DSC thermogram ของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 60:40



รูปที่ ค-8 DSC thermogram ของ WG/NRMA ที่อัตราส่วน 50:50

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน

ตารางที่ ง-1 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (% water absorption, %WA) ของชิ้นงานสูตรต่างๆ

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ							
	WG	WGNRMA 90:10	WGNRMA 80:20	WGNRMA 75:25	WGNRMA 70:30	WGNRMA 60:50	WGNRMA 50:50	NRMA
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	5.02	4.76	2.85	2.99	2.37	1.49	0.84	0.23
15	8.13	6.87	3.87	3.50	2.65	1.86	0.89	0.52
25	10.25	8.46	4.49	4.11	3.28	1.83	1.12	0.69
35	12.08	9.82	4.90	3.63	3.79	2.09	1.34	0.89
50	14.10	11.34	5.94	5.36	5.51	2.18	1.35	1.09
60	16.11	12.95	6.53	6.29	5.06	2.59	1.65	1.24
120	21.95	17.52	8.84	8.12	6.65	3.52	2.40	1.63
180	26.51	21.07	10.91	10.00	8.09	3.77	2.97	2.17
240	30.22	23.67	12.18	10.77	8.72	4.05	3.24	2.22
360	37.26	29.58	15.36	13.74	11.35	5.22	4.88	2.24
720	53.04	40.45	21.12	18.57	15.07	6.44	5.76	2.49
1440	71.16	58.27	30.68	26.98	22.21	10.13	8.99	3.83
4320	80.88	75.78	57.15	45.58	37.57	20.06	17.55	3.78

ตารางที่ ง-2 น้ำหนัก, น้ำหนักเฉลี่ย, % การดูดซึมน้ำ (%WA) ของชิ้นงาน pure WG

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)					น้ำหนัก เฉลี่ย	%WA
	1	2	3	4	5		
0	2.2975	2.1992	2.2793	2.3939	2.2376	2.2815	0.00
5	2.4007	2.3034	2.5091	2.4097	2.3577	2.3961	5.02
15	2.4712	2.3710	2.5791	2.4865	2.4266	2.4669	8.13
25	2.5175	2.4198	2.6285	2.5373	2.4732	2.5153	10.25
35	2.5585	2.4596	2.6843	2.5771	2.5065	2.5572	12.08
50	2.6047	2.5038	2.7167	2.6341	2.5562	2.6031	14.10
60	2.6463	2.5496	2.7620	2.6842	2.6037	2.6492	16.11
80	2.6834	2.5879	2.7970	2.7280	2.6375	2.6868	17.76
100	2.7279	2.6316	2.8493	2.7791	2.7411	2.7458	20.35
120	2.7720	2.6807	2.8956	2.8364	2.7272	2.7824	21.95
180	2.8743	2.7806	3.0006	2.9419	2.8337	2.8862	26.51
240	2.9604	2.8641	3.0780	3.0343	2.9175	2.9709	30.22
360	3.1113	3.0196	3.2444	3.1966	3.0861	3.1316	37.26
720	3.4585	3.3855	3.5819	3.5886	3.4435	3.4916	53.04
1440	3.8685	3.7713	4.0308	4.0115	3.8426	3.9049	71.16
4320	4.1173	3.9733	4.2906	4.2142	4.0389	4.1269	80.88

ตารางที่ ง-3 น้ำหนัก, น้ำหนักเฉลี่ย, % การดูดซึมน้ำ (%WA) ของชิ้นงาน WG/NRMA ที่อัตราส่วน 90:10

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)					น้ำหนัก เฉลี่ย	%WA
	1	2	3	4	5		
0	2.1367	2.1477	2.1150	2.0992	2.1737	2.1345	0.00
5	2.2296	2.2487	2.2116	2.2000	2.2907	2.2361	4.76
15	2.2721	2.2921	2.2621	2.2453	2.3344	2.2812	6.87
25	2.3106	2.3253	2.2927	2.2789	2.3678	2.3151	8.46
35	2.3325	2.3548	2.3260	2.3067	2.4004	2.3441	9.82
50	2.3688	2.3830	2.3581	2.3383	2.4347	2.3766	11.34
60	2.3963	2.4158	2.3903	2.3753	2.4765	2.4108	12.95
120	2.4985	2.5220	2.5179	2.4958	2.6055	2.5436	19.17
180	2.5759	2.5911	2.5651	2.5456	2.6435	2.5842	21.07
240	2.6261	2.6509	2.6178	2.6018	2.7023	2.6398	23.67
360	2.7645	2.7755	2.7343	2.7238	2.8309	2.7658	29.58
720	2.9863	3.0148	2.9670	2.9585	3.0628	2.9979	40.45
1440	3.3596	3.3984	3.3604	3.3272	3.4452	3.3782	58.27
4320	3.7263	3.7805	3.7304	3.6951	3.8273	3.7519	75.78

ตารางที่ ง-4 น้ำหนัก, น้ำหนักเฉลี่ย, % การดูดซึมน้ำ (%WA) ของชิ้นงาน WG/NRMA ที่อัตราส่วน 80:20

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)					น้ำหนักเฉลี่ย	%WA
	1	2	3	4	5		
0	1.9864	2.1262	2.1404	2.0715	2.1119	2.0873	0.00
5	2.0457	2.1841	2.2056	2.1290	2.1693	2.1467	2.85
15	2.0605	2.2009	2.2201	2.1697	2.1895	2.1681	3.87
25	2.0801	2.2194	2.2329	2.1663	2.2058	2.1809	4.49
35	2.0817	2.2316	2.2446	2.1758	2.2146	2.1897	4.90
50	2.1066	2.2491	2.2653	2.1993	2.2360	2.2113	5.94
60	2.1200	2.2618	2.2767	2.2098	2.2496	2.2236	6.53
120	2.1683	2.3178	2.3194	2.2579	2.2953	2.2717	8.84
180	2.2149	2.3468	2.3684	2.3104	2.3347	2.3150	10.91
240	2.2365	2.3761	2.3953	2.3327	2.3665	2.3414	12.18
360	2.3051	2.4462	2.4627	2.3995	2.4258	2.4079	15.36
720	2.4246	2.5670	2.5784	2.5220	2.5490	2.5282	21.12
1440	2.6292	2.7592	2.7772	2.7228	2.7504	2.7278	30.68
4320	3.0456	3.8205	3.2080	3.1446	3.1818	3.2801	57.15

ตารางที่ ง-5 น้ำหนัก, น้ำหนักเฉลี่ย, % การดูดซึมน้ำ (%WA) ของชิ้นงาน WG/NRMA ที่อัตราส่วน 70:30

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)					น้ำหนักเฉลี่ย	%WA
	1	2	3	4	5		
0	1.9475	2.0255	1.9722	2.0680	2.0137	2.0054	0.00
5	1.9830	2.0638	2.0233	2.1242	2.0701	2.0529	2.37
15	1.9950	2.0797	2.0225	2.1246	2.0705	2.0585	2.65
25	2.0074	2.0920	2.0398	2.1375	2.0789	2.0711	3.28
35	2.0174	2.1015	2.0484	2.1497	2.0904	2.0815	3.79
50	2.0290	2.1123	2.1850	2.1491	2.1036	2.1158	5.51
60	2.0403	2.1294	2.0750	2.1727	2.1166	2.1068	5.06
120	2.0732	2.1585	2.1076	2.2068	2.1474	2.1387	6.65
180	2.1059	2.1955	2.1340	2.2333	2.1691	2.1676	8.09
240	2.1175	2.2039	2.1466	2.2553	2.1777	2.1802	8.72
360	2.1660	2.2535	2.2007	2.3057	2.2393	2.2330	11.35
720	2.2354	2.3290	2.2712	2.3900	2.3121	2.3075	15.07
1440	2.3805	2.4822	2.4032	2.5302	2.4579	2.4508	22.21
4320	2.676	2.7863	2.7065	2.8658	2.7596	2.7588	37.57

ตารางที่ ง-6 น้ำหนัก, น้ำหนักเฉลี่ย, % การดูดซึมน้ำ (%WA) ของชิ้นงาน WG/NRMA ที่อัตราส่วน 60:40

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)					น้ำหนักเฉลี่ย	%WA
	1	2	3	4	5		
0	2.1785	2.1545	2.1082	2.0624	2.0540	2.1115	0.00
5	2.2061	2.1865	2.1455	2.0930	2.0838	2.1430	1.49
15	2.2204	2.1910	2.1473	2.1089	2.0863	2.1508	1.86
25	2.2206	2.1930	2.1496	2.1015	2.0862	2.1502	1.83
35	2.2270	2.2002	2.1538	2.1046	2.0924	2.1556	2.09
50	2.2262	2.2038	2.1570	2.1085	2.0921	2.1575	2.18
60	2.2373	2.2093	2.1662	2.1167	2.1016	2.1662	2.59
120	2.2519	2.2303	2.1714	2.1431	2.1320	2.1857	3.52
180	2.2622	2.2339	2.1893	2.1433	2.1274	2.1912	3.77
240	2.2689	2.2454	2.1948	2.1459	2.1300	2.1970	4.05
360	2.3027	2.2731	2.2135	2.1678	2.1518	2.2218	5.22
720	2.3203	2.2972	2.2437	2.1985	2.1783	2.2476	6.44
1440	2.4008	2.3815	2.3183	2.2776	2.2487	2.3254	10.13
4320	2.6173	2.6034	2.5232	2.4711	2.4605	2.5351	20.06

ตารางที่ ง-7 น้ำหนัก, น้ำหนักเฉลี่ย, % การดูดซึมน้ำ (%WA) ของชิ้นงาน WG/NRMA ที่อัตราส่วน 50:50

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)					น้ำหนักเฉลี่ย	%WA
	1	2	3	4	5		
0	1.8232	1.8860	1.9468	1.8852	1.9813	1.9045	0.00
5	1.8352	1.9077	1.9584	1.9077	1.9932	1.9204	0.84
15	1.8400	1.9046	1.9622	1.9011	1.9992	1.9214	0.89
25	1.8420	1.9093	1.9664	1.9070	2.0045	1.9258	1.12
35	1.8479	1.9114	1.9740	1.9107	2.0058	1.9300	1.34
50	1.8484	1.9140	1.9726	1.9110	2.0053	1.9303	1.35
65	1.8532	1.9159	1.9772	1.9169	2.0166	1.9360	1.65
80	1.8662	1.9283	1.9909	1.9249	2.0218	1.9464	2.20
100	1.8758	1.9325	1.9916	1.9308	2.0232	1.9508	2.43
120	1.8685	1.9330	1.9950	1.9311	2.0237	1.9503	2.40
180	1.8768	1.9521	2.0031	1.9417	2.0319	1.9611	2.97
240	1.8851	1.9561	2.0069	1.9445	2.0383	1.9662	3.24
360	1.9674	1.9674	2.0271	1.9623	2.0630	1.9974	4.88
720	1.9275	1.9952	2.0543	2.0088	2.0852	2.0142	5.76
1440	1.9926	2.0581	2.1198	2.0556	2.1521	2.0756	8.99
4320	2.1839	2.2891	2.2080	2.277	2.2354	2.2387	17.55

ตารางที่ ง-8 น้ำหนัก, น้ำหนักเฉลี่ย, % การดูดซึมน้ำ (%WA) ของชิ้นงาน NRMA

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)			น้ำหนักเฉลี่ย	%WA
	1	2	3		
0	1.4885	1.5434	1.4990	1.5103	0.0000
5	1.4911	1.5521	1.5012	1.5148	0.2376
15	1.4958	1.5536	1.5079	1.5191	0.5165
25	1.4973	1.5582	1.5099	1.5218	0.6948
30	1.4980	1.5654	1.5110	1.5248	0.8967
50	1.4984	1.5718	1.5132	1.5278	1.0931
60	1.4985	1.5790	1.5125	1.5300	1.2410
120	1.4977	1.5973	1.5130	1.5360	1.6371
180	1.4985	1.6205	1.5136	1.5442	2.1769
240	1.4994	1.6213	1.5138	1.5448	2.2188
360	1.5002	1.6212	1.5143	1.5452	2.2453
720	1.5110	1.6215	1.5147	1.5491	2.4990
1440	1.5244	1.6548	1.5286	1.5693	3.8355
4320	1.5247	1.6542	1.5268	1.5686	3.7892

ประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1. ชื่อ - สกุล (นาย,นาง,นางสาว) | นางสาว สุดศิริ เหมศรี |
| | SUDSIRI HEMSRI |
| 2. วัน เดือน ปีเกิด | 7 พฤศจิกายน 2516 |
| 3. ตำแหน่งทางวิชาการปัจจุบัน | อาจารย์ <input type="checkbox"/> ข้าราชการ <input checked="" type="checkbox"/> พนักงาน |
| 4. สถานที่ทำงาน | ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม |
| โทรศัพท์ | 0-3421-9363 โทรสาร 0-3421-9363 |
| E-mail | sudsirihemsri@yahoo.com , sudairih@hotmail.com |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 157/47 ซ.อิสรภาพ 43 ถ.อิสรภาพ แขวงบ้านช่างหล่อ เขต
บางกอกน้อย กรุงเทพมหานคร 10700 |
| โทรศัพท์ | 0-2412-1838 |
| 5. ประวัติการศึกษา | |
| ปริญญาตรีสาขา | เคมี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| ปีที่จบ | 2539 |
| ปริญญาโทสาขา | วิศวกรรมเคมี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| ปีที่จบ | 2543 |
| ปริญญาเอกสาขา | วิศวกรรมเคมี, University of Connecticut, USA |
| ปีที่จบ | 2554 |
| 6. วิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา | |
| ระดับปริญญาโท | |
| ชื่อเรื่อง | “ตัวเร่งปฏิกิริยาเมทัลโลซีนที่มีตัวรองรับสำหรับการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีน” |

ระดับปริญญาเอก

ชื่อเรื่อง

“Application of Wheat Gluten in Polymer Composites
and Composite Particleboard”

7. สาขาวิชาที่เชี่ยวชาญ

เคมีพอลิเมอร์ พอลิเมอร์คอมพอสิต

ผลงานวิจัย/ผลงานสร้างสรรค์ทางด้านศิลปะและการออกแบบที่ดำเนินการเสร็จแล้ว

1. โครงการวิจัยเรื่อง “การปรับปรุงความเหนียวของพลาสติกชีวภาพที่เตรียมได้จากกลูเตนจากข้าวสาลีด้วยยางธรรมชาติที่ถูกอีพอกซิไดซ์” ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ตอนที่ 3 ผลงานวิจัยหรือผลงานสร้างสรรค์ที่กำลังดำเนินการ

1. โครงการวิจัยเรื่อง “การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมกลูเตนจากแป้งสาลีและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต” ทุนอุดหนุนการวิจัยการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม ของ ศว. พว. ประจำปี 2556 จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

2. โครงการวิจัยเรื่อง “การศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากข้าวสาลีและยางธรรมชาติที่ถูกอีพอกซิไดซ์” ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก “เงินกองทุนวิจัยและสร้างสรรค์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม” ประจำปีงบประมาณ 2557

ระดับปริญญาเอก

ชื่อเรื่อง	“Preparation of Polydiacetylene containing Copolyurethane as strain gauge in glass reinforced epoxy composites”
7. สาขาวิชาที่เชี่ยวชาญ	เคมีพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ฟิสิกส์ พอลิเมอร์คอมพอสิต

ผลงานวิจัย/ผลงานสร้างสรรค์ทางด้านศิลปะ และการออกแบบที่ดำเนินการเสร็จสิ้นแล้ว

1. โครงการ “ศึกษาวิธีการเตรียม Prepreg จาก vinyl ester resin เพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการพันท่อด้านในของท่อเสริมแรงที่สามารถทนสารเคมีได้”, ได้รับทุนสนับสนุน จากโครงการให้ทุนสนับสนุน โครงการงานอุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี (IPUS) ประจำปีการศึกษา 2547 หมายเลขโครงการ FE0059/47.

2. โครงการ “การเตรียม epoxy gel coat สำหรับการทำแบบช็องอ ในการผลิตท่อเสริมแรง”, ได้รับทุนสนับสนุน จากโครงการให้ทุนสนับสนุนโครงการงานอุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี (IPUS) ประจำปีการศึกษา 2547 หมายเลขโครงการ FE0060/47

3. โครงการ “การปรับปรุงการยึดติดระหว่าง midsole และ outsole ที่เชื่อมกันโดยไม่อาศัยกาว โดยการปรับปรุงสูตรของยางทั้งสอง”, ได้รับทุนสนับสนุน จากโครงการให้ทุนสนับสนุนโครงการงานอุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี (IPUS) ประจำปีการศึกษา 2547 หมายเลขโครงการ FE0191/47

4. โครงการ “การใช้ยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรเพื่อปรับปรุงความเหนียวของอีพอกซีเรซิน”, ได้รับทุนสนับสนุนจาก โครงการวิจัยขนาดเล็กยางพารา, โครงการวิจัยแห่งชาติยางพารา ฝ่ายอุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปี 2547 หมายเลขสัญญา RDG4850001

5. โครงการ “การศึกษาการทำให้ midsole และ outsole ยึดติดกันโดยไม่อาศัยกาว และพัฒนาปรับปรุงสภาวะการผลิตและสูตรคอมพาวด์ midsole และสูตร outsole”, ได้รับทุนสนับสนุน จากโครงการให้ทุนสนับสนุนโครงการงานอุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี (IPUS) ประจำปีการศึกษา 2546 หมายเลขโครงการ FE0085/46

6. โครงการ “กลุ่มโครงการวิจัยย่อยการประยุกต์ใช้น้ำยางธรรมชาติในการผลิตผลิตภัณฑ์-มศก.” ได้รับทุนสนับสนุนจาก โครงการวิจัยแห่งชาติยางพารา ฝ่ายอุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปี 2546 หมายเลขสัญญา RDG4750003 ประกอบด้วยโครงการย่อยดังนี้

1. โครงการ “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเหลืองในแผ่น PVC Overlay ที่ผลิตโดยใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact Modifier”

2. โครงการ “การผลิต PVC สำหรับงาน Vacuum Thermoforming โดยใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact Modifier”

7. โครงการ “การผลิต PVC Overlay โดยใช้ยางธรรมชาติเป็น Impact Modifier”, ได้รับทุนสนับสนุน จากโครงการให้ทุนสนับสนุนโครงการงานอุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี (IPUS) ประจำปีการศึกษา 2545 หมายเลขโครงการ FE0009-CP0080/45

โครงการวิจัยที่ได้รับทุนในปีการศึกษา 2548

1. โครงการการศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์สารเชื่อมติดจากยางธรรมชาติสำหรับการทำลู่วิ่งเพื่อใช้ในประเทศ (โครงการวิจัยขนาดเล็ก-SPR)
2. โครงการการปรับปรุงกระบวนการเตรียม prepreg ที่ใช้สำหรับการพันท่อด้านในของท่ออีพอกซีเสริมแรงด้วยใยแก้วเพื่อประยุกต์ใช้ในท่อทนต่อสารเคมี (IPUS-I4805011)
3. โครงการการปรับปรุงความสามารถในการต้านไฟของท่อร้อยสายไฟอีพอกซีเสริมแรงด้วยใยแก้วที่ผลิตด้วยกระบวนการพันท่อ (IPUS-I4805012)

โครงการวิจัยที่ได้รับทุนในปีการศึกษา 2551-2554

1. โครงการวิจัยย่อย งบประมาณแผ่นดิน “การใช้ประโยชน์จากการมะพร้าวเหลือใช้ในงานวัสดุบรรจุภัณฑ์” ปีงบประมาณ 2552-2554
2. โครงการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน เรื่อง “โครงการ การศึกษาการใช้ซิลิกาเจล ขนาดนาโนชนิดมีรูพรุน ที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบ เพื่อเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยกระบวนการโซลเจล” ปีงบประมาณ 2552-2553 (กำลังดำเนินการ จะสิ้นสุดโครงการ ในเดือน กันยายน 2553)

ผลงานที่เคยได้รับรางวัล

รางวัลรองชนะเลิศอันดับ 1 ในเรื่อง การศึกษาการทำให้ midsole และ outsole ยึดติดกันโดยไม่อาศัยกาว และพัฒนาปรับปรุงสภาวะการผลิตและสูตรคอมพาวด์ midsole และสูตร outsole จากการผลิตผลงานนวัตกรรมแห่งประเทศไทย ประจำปี 2547