



อิทธิพลของการเติมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรที่มีต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกที่  
เตรียมจากแป้ง

โดย

นายภูวนัฐ วัศุตม์ชานนทน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

อิทธิพลของการเติมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรที่มีต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกที่  
เตรียมจากแป้ง

โดย

นายภูวนัฐ วัศุตม์ชานนทน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**INFLUENCE OF ADDING NATURAL RUBBER AND MODIFIED NATURAL RUBBER ON  
PROPERTIES OF THERMOPLASTIC STARCH**

**By**

**Puwanut Wasutchanon**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree**

**MASTER OF ENGINEERING**

**Department of Materials Science and Engineering**

**Graduate School**

**SILPAKORN UNIVERSITY**

**2008**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ อิทธิพลของการเติมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรที่มีต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง ” เสนอโดย นายภูวนันท์ วสุตม์ชานนทน์ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. อาจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส
2. อาจารย์ ดร.อำนาจ สิทธีตระกูล

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ศศิประภา รัตนดิถก ณ ภูเก็ต )

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อำนาจ สิทธีตระกูล)

...../...../.....

49402201 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : thermoplastic starch/ natural rubber/ hydroxylated epoxidized natural rubber/

polyisoprene-graft-maleic anhydride

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ : อิทธิพลของการเติมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรที่มีต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.

วันชัย เลิศวิจิตรจรัส และ อ.ดร.อำนาจ สิทธิตระกูล. 121 หน้า.

แป้งจัดเป็นหนึ่งในวัตถุดิบตามธรรมชาติที่มีอยู่เป็นจำนวนมากและสามารถสร้างขึ้นมาทดแทนได้ง่าย แป้งสามารถนำไปเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch, TPS) ซึ่งมีศักยภาพในการนำไปใช้ทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบประเภทปิโตรเลียมได้ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้พยายามทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานต่อแรงกระแทกของ TPS ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้ glycerol เป็น พลาสติกไซเซอร์ในปริมาณ 25% โดยน้ำหนัก และใช้การเติมยางชนิดต่าง ๆ คือ ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR), hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH), และ polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA) เป็นสารปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระแทกในอัตราส่วนต่าง ๆ (ยาง 1%, 3%, 5%, 7%, 10% โดยน้ำหนัก) เพื่อศึกษาสัดส่วนและชนิดของยางที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล, สมบัติทางความชื้น, และสมบัติทางสัณฐานวิทยา ในงานวิจัยนี้จะผสม TPS แบบ melt mixing โดยใช้เครื่องผสมภายใน จากนั้นนำไปบดและขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่อง compression molding จากการทดลอง พบว่า การเติม PI-g-MA ทำให้ TPS มีความต้านทานต่อแรงกระแทกได้ดีที่สุด รองลงมาได้แก่ ENR-OH และ NR ตามลำดับ โดย TPS ในระบบที่เติม PI-g-MA ที่ 3% สามารถปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกได้ดีที่สุด ปริมาณยางที่มากขึ้นทำให้ค่า Young's modulus และ tensile strength ลดลง ส่วนค่า percentage strain at break จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนผลของการทดสอบการดูดความชื้น พบว่า ชิ้นงาน TPS มีการดูดความชื้นลดลงเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ส่วนผลของชนิดของยางเมื่อมีปริมาณเท่ากันไม่แสดงผลที่เด่นชัดต่อสมบัติการดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS ผลการทดสอบด้วย SEM แสดงให้เห็นถึงแรงยึดเหนี่ยวที่ไม่ค่อยแข็งแรงระหว่างเฟสของ TPS/NR แต่พบแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงระหว่างเฟสของ TPS/ENR-OH และ TPS-PI-g-MA

---

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. .... 2. ....

49402201 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORDS : THERMOPLASTIC STARCH/ NATURAL RUBBER/ HYDROXYLATED  
EPOXIDIZED NATURAL RUBBER/ POLYISOPRENE-GRAFT-MALEIC  
ANHYDRIDE

PUWANUT WASUTCHANON : INFLUENCE OF ADDING NATURAL RUBBER AND  
MODIFIED NATURAL RUBBER ON PROPERTIES OF THERMOPLASTIC STARCH. THESIS  
ADVISORS : WANCHAI LERDWIJITJARUD, Ph.D. , AND AMNARD SITTATTRAKUL Ph.D.. 121  
pp.

Starch is one of the most abundant renewable and low cost natural resources. Starch can be converted to thermoplastic starch (TPS), which has high potential to replace the petroleum based plastics. In this research, the authors had tried to improve the impact property of TPS derived from tapioca flour which was plasticized by glycerol at 25% by weight. The influence of adding natural rubber (NR), hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH), and polyisoprene-*graft*-maleic anhydride (PI-*g*-MA) as impact modifier in various ratios (1%, 3%, 5%, 7%, 10% w/w of rubber) on mechanical properties, moisture adsorption, morphology was investigated in term of the amount and types of rubber loading. TPS was prepared by melt mixing method in an internal mixer, and then the composites were grinded and compressed by compression molding machine to give specimens for further testing. The results showed that the impact resistance of TPS was best improved by mixing with PI-*g*-MA, followed by ENR-OH and NR respectively. The TPS with 3% w/w PI-*g*-MA content had the highest impact property. As the amount of rubber increased, Young's modulus and tensile strength decreased while percentage of strain at break increased. The moisture adsorption testing indicated that the moisture adsorption decreased when the amount of rubber content increased. Effect of types of rubber added in the same quantity showed no clear influence on moisture adsorption property of TPS. Scanning electron microscopy study of the specimen revealed clearly the poor interaction at the interphase of TPS/NR, whereas the strong interactions at the interphase of TPS/ENR-OH and TPS/PI-*g*-MA were detected.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนงานวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติ ด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา และภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และอาจารย์ ดร. อำนาจ สิทธิตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมของงานวิจัยนี้ ที่คอยให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนการดำเนินงานวิจัยด้วยความอบอุ่น ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์ ที่คอยให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาช่วงต้นของงานวิจัยนี้ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เคยสั่งสอนข้าพเจ้ามาตั้งแต่เด็กจนถึงปัจจุบัน

ขอขอบพระคุณพี่พินิจ เจียนระลึก ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดเตรียมอุปกรณ์ สารเคมีต่าง ๆ และช่วยแนะนำวิธีแก้ไขปัญหาด้านเครื่องมือต่าง ๆ มากมาย ขอขอบพระคุณพี่วิฑูรย์ แซ่โง้ว นักวิทยาศาสตร์ ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำคณะวิทยาศาสตร์ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทดสอบ SEM ตลอดจนงานวิจัย ขอขอบคุณบริษัทเมทเธอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการทดสอบ DSC ที่อุณหภูมิต่ำ ขอขอบคุณบุคลากรที่สำนักงานภาควิชาฯ (พี่สุชาดา สายสิทธิ์, พี่นุศรา สุชีวงศ์, พี่กัญญา เล็กแดง อยู่, พี่กัญญา เผ่าพัฒน์, เจดต์ จงอยู่ดี) ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในด้านการเงินและเอกสารต่าง ๆ จนกระทั่งเสร็จสิ้นงานวิจัย

ขอบคุณพี่เรนทร์ อาศัยพานิชย์, พี่กิตติพัฒน์ เล่งเจริญ, พี่โกสินทร์ หาชะวี ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอบใจพี่ไพโรจน์, พี่นัฐพร, พี่ปิยาณี, พี่วรเทพ, สุชาติ, สุภัทร์ชัย, นันทวัฒน์, สุรเชษฐ์ กมลทิพย์และพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ปริญญาโททุกคน ที่คอยช่วยเหลือและแบ่งปันกันตลอด ขอบใจชัดพันธ์ ชุมนุสนธิ์ และวิภาวรรณ บุตรอำไพ เพื่อนรักที่คอยเป็นกำลังใจและช่วยเหลือตลอดเวลา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่และคุณลุงที่คอยดูแลและอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าตั้งแต่เด็กจนถึงปัจจุบันเป็นอย่างดีที่สุด รวมถึงครอบครัวและญาติพี่น้องที่คอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป .....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
แนวคิดของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย .....	3
ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย .....	3
ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแป้ง.....	5
องค์ประกอบภายในแป้ง.....	6
คุณสมบัติบางประการของเม็ดแป้ง .....	10
ความหมายของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง.....	11
พลาสติกไซเซออร์.....	13
ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปร.....	14
ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR).....	14
ยางธรรมชาติที่มีหมู่อีพ็อกไซด์อยู่บน โมเลกุล (epoxidized natural rubber, ENR).....	16
polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA) .....	17
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	20
เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ .....	20
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	20
สารเคมี.....	20

บทที่	หน้า
ดัชนีอักษรย่อ.....	21
วิธีดำเนินงานวิจัย.....	22
การเตรียมแป้งและการสังเคราะห์ยางชนิดต่าง ๆ .....	22
การเตรียมแป้งก่อนทำการผสม.....	22
การเตรียมยางแห้งจากน้ำยางเข้มข้น 60% w/w DRC (dry rubber content) .....	22
การเตรียมยางธรรมชาติที่หม้อพ็อกไซค์บน โมเลกุลผ่านการ เปิดวงเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxylated epoxidized natural rubber, ENR-OH) จากน้ำยางเข้มข้น 60% w/w DRC.....	23
การเตรียมและการขึ้นรูปชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง (thermoplastic starch, TPS).....	26
การผสม compound และการเตรียม thermoplastic starch (TPS) ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็นยาง natural rubber (NR) และ hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH).....	26
การผสม compound และการเตรียม thermoplastic starch (TPS) ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA) .....	27
การขึ้นรูปชิ้นงาน thermoplastic starch (TPS) เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล .....	28
การพิสูจน์เอกลักษณ์และการทดสอบสมบัติต่าง ๆ .....	31
การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ natural rubber (NR), epoxidized natural rubber (ENR), hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH), polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA) และ master batch ของแป้งมันสำปะหลัง (tapioca flour) กับ polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA).....	31
การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน thermoplastic starch (TPS).....	31
การศึกษาปริมาณการดูดความชื้นของชิ้นงาน thermoplastic starch (TPS) .....	32
การวิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	33

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	35
การสังเคราะห์ hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH) และ การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ natural rubber (NR), epoxidized natural rubber (ENR), hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH), แป้งมันสำปะหลัง (tapioca flour), polyisoprene- <i>graft</i> -maleic anhydride (PI- <i>g</i> -MA) และ master batch ของแป้งมันสำปะหลัง (tapioca flour) กับ polyisoprene- <i>graft</i> -maleic anhydride (PI- <i>g</i> -MA) .....	35
การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) .....	35
การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ natural rubber (NR), epoxidized natural rubber (ENR), hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH).....	35
natural rubber (NR).....	37
epoxidized natural rubber (ENR).....	38
hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH).....	39
การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแป้งมันสำปะหลัง (tapioca flour), polyisoprene- <i>graft</i> -maleic anhydride (PI- <i>g</i> -MA) และ master batch ของแป้งมันสำปะหลัง (tapioca flour) กับ polyisoprene- <i>graft</i> -maleic anhydride (PI- <i>g</i> -MA) .....	41
แป้งมันสำปะหลัง (tapioca flour).....	42
polyisoprene- <i>graft</i> -maleic anhydride (PI- <i>g</i> -MA).....	43
การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR) .....	46
การหา % epoxidation และ % ring opening ของยาง ENR และ ENR-OH ด้วยเทคนิค Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR).....	46
การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน thermoplastic starch (TPS).....	48
การวิเคราะห์สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact properties).....	48
การวิเคราะห์สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยึด (tensile properties).....	50

บทที่	หน้า
การศึกษาปริมาณการดูดความชื้นของชิ้นงาน thermoplastic starch (TPS).....	54
การวิเคราะห์ปริมาณการดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติมยาง ต่างชนิดกันและมีสัดส่วนแตกต่างกัน .....	54
การวิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	56
การศึกษาลักษณะพื้นผิวรอยแตกหักของ TPS เมื่อ อนุภาคของยางยังอยู่ในระบบ.....	56
การศึกษาลักษณะพื้นผิวรอยแตกหักของ TPS เมื่อ อนุภาคของยางถูกสกัดออกจากระบบ .....	61
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	64
สรุปผลการทดลอง .....	64
ข้อเสนอแนะ .....	65
บรรณานุกรม .....	66
ภาคผนวก .....	68
ภาคผนวก ก การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการผสม .....	69
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของ ชิ้นงาน TPS แต่ละระบบ .....	73
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยึดของ ชิ้นงาน TPS แต่ละระบบ .....	90
ภาคผนวก ง ผลการการศึกษาปริมาณการดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS .....	107
ภาคผนวก จ DSC thermogram ของยางแต่ละชนิด .....	114
ภาคผนวก ฉ สภาพะของการผสม master batch ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	117
ภาคผนวก ช TGA thermogram ของแป้งมันสำปะหลังและ polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA).....	119
ประวัติผู้วิจัย .....	121

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ปริมาณอะไมโลสและปริมาณอะไมโลเพกทินที่พบในแป้งแต่ละชนิด.....	9
3.1	อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมแป้ง glycerol และยางแต่ละชนิด.....	27
3.2	อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมแป้ง glycerol และ master batch.....	28
4.1	อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ได้ฟลักที่เกี่ยวกับการเกิดการเชื่อมขวาง (ระหว่างหมู่ -OH ของแป้งกับส่วนของ maleic anhydride ของ PI-g-MA) ต่อพื้นที่ได้ฟลักของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (-CH <sub>2</sub> , -CH <sub>3</sub> ) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	45
4.2	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทกของ TPS สูตรต่าง ๆ.....	49
4.3	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงยึดของ TPS สูตรต่าง ๆ.....	51
ก.1	อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมแป้ง glycerol และยางแต่ละชนิด .....	70
ก.2	อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมแป้ง glycerol และ master batch .....	71
ข.1	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-ORB.....	74
ข.2	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-1NR.....	75
ข.3	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-3NR.....	76
ข.4	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-5NR.....	77
ข.5	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-7NR.....	78
ข.6	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-10NR.....	79
ข.7	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-1ENR-OH	80
ข.8	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-3ENR-OH	81
ข.9	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-5ENR-OH	82
ข.10	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-7ENR-OH	83
ข.11	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-10ENR-OH	84
ข.12	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-1PI-g-MA.	85
ข.13	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-3PI-g-MA.	86
ข.14	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-5PI-g-MA.	87
ข.15	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-7PI-g-MA.	88
ข.16	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-10PI-g-MA	89
ค.1	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยึดของชิ้นงาน TPS-ORB .....	91
ค.2	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยึดของชิ้นงาน TPS-1NR .....	92

ตารางที่		หน้า
ค.3	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-3NR .....	93
ค.4	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-5NR .....	94
ค.5	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-7NR .....	95
ค.6	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-10NR.....	96
ค.7	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-1ENR-OH .....	97
ค.8	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-3ENR-OH.....	98
ค.9	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-5ENR-OH.....	99
ค.10	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-7ENR-OH.....	100
ค.11	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-10ENR-OH.....	101
ค.12	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-1PI-g-MA .....	102
ค.13	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-3PI-g-MA .....	103
ค.14	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-5PI-g-MA .....	104
ค.15	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-7PI-g-MA .....	105
ค.16	ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-10PI-g-MA .....	106
ง.1	ผลการคำนวณร้อยละของการดูความชื้นในแต่ละวันของชิ้นงานทดสอบ ภายหลังการคงความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% .....	108
ฉ.1	พื้นที่ได้ฟิค ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการเชื่อมขวาง (ระหว่างหมู่ -OH ของแป้งกับส่วนของ maleic anhydride ของ PI-g-MA) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	118
ฉ.2	อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ได้ฟิคที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการเชื่อมขวาง (ระหว่างหมู่ -OH ของแป้งกับส่วนของ maleic anhydride ของ PI-g-MA) ต่อพื้นที่ได้ฟิคของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (-CH <sub>2</sub> , -CH <sub>3</sub> ) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	118

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	สูตรโครงสร้างทางเคมีของ D-glucose .....	6
2.2	โครงสร้างของอะไมโลส .....	7
2.3	โครงสร้างของอะไมโลเพคติน .....	7
2.4	โครงสร้างที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดแบบ cluster ของ amylopectin .....	8
2.5	น้ำยางที่ได้จากต้นยางพารา (Hevea brazilliensis).....	15
2.6	สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ (cis-1,4-polyisoprene) .....	15
2.7	ปฏิกิริยา epoxidation ระหว่างยางธรรมชาติกับ peracid .....	17
2.8	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ polyisoprene .....	18
2.9	ปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติเหลวกับ maleic anhydride .....	19
3.1	แป้งในสถานะสำหรับอบแป้ง .....	22
3.2	compound ในถุง polyethylene .....	26
3.3	แม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ .....	29
3.4	ลักษณะก่อนการปิดประกบแม่พิมพ์ .....	29
3.5	ลักษณะหลังปิดประกบแม่พิมพ์ .....	29
3.6	การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง compression molding .....	30
3.7	ลักษณะที่ได้หลังจากผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี compression molding .....	30
3.8	chamber เก็บชิ้นงานทดสอบที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 53% .....	33
4.1	ปฏิกิริยาทั้ง 2 ขั้นตอนที่ใช้ในการสังเคราะห์ ENR-OH .....	36
4.2	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ NR .....	37
4.3	FT-IR spectrum ของ NR .....	37
4.4	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ ENR .....	38
4.5	FT-IR spectrum ของ ENR .....	38
4.6	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ ENR-OH .....	39
4.7	FT-IR spectrum ของ ENR-OH .....	39
4.8	กลไกของปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอีพอกไซด์ใน ENR ด้วย HCl .....	40
4.9	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง .....	42
4.10	FT-IR spectrum ของแป้งมันสำปะหลัง .....	42
4.11	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ PI-g-MA .....	43

รูปที่		หน้า
4.12	FT-IR spectrum ของ Pi-g-MA.....	43
4.13	FT-IR spectrum ของ master batch ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ก) ช่วง wave number ที่ 4000 – 1000 cm <sup>-1</sup> (ข) ช่วง wave number ที่ 2000 – 1500 cm <sup>-1</sup> .....	44
4.14	ปฏิกิริยา esterification ระหว่างโมเลกุลของแป้ง กับ PI-g-MA .....	45
4.15	<sup>1</sup> H NMR spectrum ของ NR .....	46
4.16	<sup>1</sup> H NMR spectrum ของ ENR .....	46
4.17	<sup>1</sup> H NMR spectrum ของ ENR-OH.....	47
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่าง impact strength กับปริมาณของยางที่ใช้ในแต่ละชนิด ในการเตรียมชิ้นงาน TPS .....	49
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่าง Young's modulus กับปริมาณของยางที่ใช้ในแต่ละชนิด ในการเตรียมชิ้นงาน TPS .....	51
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่าง tensile strength กับปริมาณของยางที่ใช้ในแต่ละชนิด ในการเตรียมชิ้นงาน TPS .....	52
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage strain at break กับปริมาณของยางที่ใช้ ในแต่ละชนิดในการเตรียมชิ้นงาน TPS .....	52
4.22	% moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น NR ในแต่ละวัน.....	54
4.23	% moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น ENR-OH ในแต่ละวัน.....	54
4.24	% moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น Pi-g-MA ในแต่ละวัน.....	55
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่าง % moisture adsorption กับปริมาณของยางที่ใช้ในแต่ละชนิด ในการเตรียมชิ้นงาน TPS ในระยะเวลาทั้งสิ้น 7 วัน.....	55
4.26	SEM micrograph แสดงผลของปริมาณการเติม NR ที่แตกต่างกันก่อนทำ soxhlet extraction ด้านซ้ายกำลังขยาย 500 เท่า และด้านขวากำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) และ (ข) NR = 0% (ค) และ (ง) NR = 3% (จ) และ (ฉ) NR = 7%.....	57
4.27	SEM micrograph แสดงผลของปริมาณการเติม ENR-OH ที่แตกต่างกันก่อนทำ soxhlet extraction ด้านซ้ายกำลังขยาย 500 เท่า และด้านขวากำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) และ (ข) ENR-OH = 3% (ค) และ (ง) ENR-OH = 7%....	58

รูปที่		หน้า
4.28	SEM micrograph แสดงผลของปริมาณการเติม PI-g-MA ที่แตกต่างกันก่อนทำ soxhlet extraction ด้านซ้ายกำลังขยาย 500 เท่า และด้านขวากำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) และ (ข) PI-g-MA = 3% (ค) และ (ง) PI-g-MA = 7%.....	59
4.29	SEM micrograph แสดงผลของปริมาณการเติม NR ที่แตกต่างกันหลังทำ soxhlet extraction ด้านซ้ายกำลังขยาย 500 เท่า และด้านขวากำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) และ (ข) NR = 3% (ค) และ (ง) NR = 7%.....	61
4.30	SEM micrograph แสดงผลของปริมาณการเติม ENR-OH ที่แตกต่างกันหลังทำ soxhlet extraction ด้านซ้ายกำลังขยาย 500 เท่า และด้านขวากำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) และ (ข) ENR-OH = 3% (ค) และ (ง) ENR-OH = 7%.....	62
4.31	SEM micrograph แสดงผลของปริมาณการเติม PI-g-MA ที่แตกต่างกันหลังทำ soxhlet extraction ด้านซ้ายกำลังขยาย 500 เท่า และด้านขวากำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) และ (ข) PI-g-MA = 3% (ค) และ (ง) PI-g-MA = 7%.....	63
จ.1	DSC thermogram ของธรรมชาติ (natural rubber, NR) .....	115
จ.2	DSC thermogram ของ hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH) .....	115
จ.3	DSC thermogram ของ polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA).....	116
ช.1	TGA thermogram แป้งมันสำปะหลังและ polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA) ภายใต้บรรยากาศของก๊าซออกซิเจน .....	120

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันความนิยมในการนำพลาสติกมาใช้ในชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้นโดยนำมาใช้แทนวัสดุธรรมชาติ เช่น ไม้ หนัง โลหะต่าง ๆ เป็นต้น พลาสติกจึงมีส่วนร่วมในผลิตภัณฑ์เกือบทุกประเภทเสมอ เช่น บรรจุภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ เครื่องใช้ในบ้าน เฟอร์นิเจอร์ ของเด็กเล่น เนื่องจากพลาสติกมีข้อดีคือ น้ำหนักเบา มีความทนทาน สามารถทำเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ง่าย สี สันสวยงาม และราคาถูก [1]

พลาสติกส่วนมากเตรียมมาจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ (synthetic polymer) ซึ่งเป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) มีแหล่งกำเนิดจากน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ (crude oil and natural gas) ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดสิ้นไปไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ในระยะเวลาอันสั้นได้ นอกจากนี้ ความทนทานของพลาสติกกลับเป็นข้อเสียในการกำจัด กล่าวคือ พลาสติกย่อยสลายได้ยากในกระบวนการทางธรรมชาติ พลาสติกที่ใช้แล้วอาจก่อให้เกิดปัญหาอย่างต่อเนื่องสู่สิ่งแวดล้อมถ้าขาดการจัดการที่เหมาะสม เช่น เกิดการตกค้างของพลาสติกในสิ่งแวดล้อมตามพื้นดินและในแหล่งน้ำซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น เป็นต้น [2]

จากปัญหาของพลาสติกดังกล่าวข้างต้น ก่อให้เกิดมลภาวะต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมมากขึ้นตามลำดับ ส่งผลทำให้หน่วยงานต่าง ๆ มีการเร่งการวิจัยและพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้โดยผลิตจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ (natural polymer) ซึ่งเป็นทรัพยากรที่สามารถสร้างทดแทนได้และสามารถย่อยสลายได้เองในธรรมชาติเพื่อนำมาใช้ทดแทนพลาสติก พลาสติกย่อยสลายที่ผลิตจากพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติโดยเฉพาะแป้ง (starch) ได้ทวีความสำคัญมากขึ้นเนื่องมาจากข้อดีคือ แป้งเป็นวัตถุดิบตามธรรมชาติที่มีอยู่จำนวนมาก มีราคาถูกและสามารถสร้างขึ้นมาทดแทนได้ง่ายโดยไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังสามารถย่อยสลายได้เอง 100 % พืชที่มีแป้งในปริมาณมากได้แก่ ข้าว มันสำปะหลัง มันฝรั่ง ข้าวโพด ข้าวสาลีและพวกธัญพืชต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้วธรรมชาติของแป้งจะมีคุณสมบัติคล้ายกับพลาสติกพวก thermoset คือ เมื่อแป้ง

ได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวก่อนที่จะเกิดการหลอม ซึ่งเป็นสมบัติที่จำกัดการนำไปใช้งาน และการขึ้นรูปแป้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงแป้นให้มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก โดยวิธีการหนึ่งคือ นำแป้นผสมกับพลาสติกไซเซออร์ จากนั้นทำการให้ความร้อนก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้น หรือ thermoplastic starch (TPS)

ข้อจำกัดที่สำคัญของการนำ TPS มาใช้ประโยชน์คือ ความเปราะของ TPS ทำให้รับแรงกระแทกได้น้อย ซึ่งในปัจจุบันผลิตภัณฑ์จาก TPS ยังคงมีความเปราะค่อนข้างสูงเนื่องจากโครงสร้างของโมเลกุลแป้นเอง นอกจากนี้การใช้เอ็กเทอร์นอลพลาสติกไซเซออร์ (external plasticizer) ที่เป็นพวกพอลิโออลต่างๆ เช่น กลีเซอรอล (glycerol) ไกลคอล (glycol) ซอร์บิทอล (sorbitol) หรือแม้แต่ น้ำตาล จะส่งผลให้เกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการเกิดผลึกใหม่อีกครั้ง (recrystallization) เมื่อเวลาผ่านไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง [3] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำให้ TPS สามารถรับแรงกระแทกได้ดียิ่งขึ้น โดยการเตรียม TPS ที่มียางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ถูกตัดแปรเป็นสารเติมแต่ง ซึ่งนอกจากจะช่วยเป็นแหล่งทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบประเภทปิโตรเลียมแล้ว ยังสามารถเพิ่มคุณค่าให้กับ TPS และเป็นแนวทางในการนำแป้นไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตเทอร์โมพลาสติกได้จริงในเชิงอุตสาหกรรม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียม thermoplastic starch (TPS) จากแป้นมันสำปะหลังโดยใช้ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR), hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH) และ polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA) เป็นสารเติมแต่ง และใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซออร์

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณของยางที่มีต่อสมบัติเชิงกล, สมบัติทางความชื้น และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของ TPS ที่เตรียมได้

## 1.3 แนวคิดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการเตรียม thermoplastic starch (TPS) ที่ได้จากการผสมระหว่างแป้น, glycerol ซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซออร์ และสารเติมแต่งประเภทสารเพิ่มความต้านทานต่อแรงกระแทก โดยจะทำการเปรียบเทียบผลของชนิดและปริมาณของยางระหว่างยางธรรมชาติ (natural rubber, NR), hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH) และ polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA) ต่อสมบัติเชิงกล, สมบัติทางความชื้น, และสมบัติทางสัณฐานวิทยา โดยใช้แป้นมันสำปะหลังเป็นองค์ประกอบหลัก ในขณะที่สารเพิ่มความต้านทานต่อแรง

กระแทกซึ่งได้แก่ยางแต่ละชนิดนั้น จะผสมเพื่อเตรียมเป็น TPS ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อหาทางปรับปรุงข้อด้อยของ TPS ในเรื่องความเปราะ โดยมุ่งหวังว่า ENR-OH และ PI-g-MA จะสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกของ TPS ได้ เมื่อเทียบกับ TPS ที่มี NR เป็นสารเติมแต่ง

โดยงานวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 : สังเคราะห์ ENR-OH พร้อมทั้งพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ  $^1\text{H NMR}$

ส่วนที่ 2 : หาสถานะของ TPS ที่มี PI-g-MA เป็นสารเติมแต่ง พร้อมทั้งพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR

ส่วนที่ 3 : ปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระแทกของ TPS โดยการเติม NR, ENR-OH และ PI-g-MA ที่มีการปรับปริมาณของยางที่ระดับต่าง ๆ

ส่วนที่ 4 : ทดสอบสมบัติเชิงกล, สมบัติทางความชื้น, และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของ TPS ที่เตรียมได้

#### 1.4 ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย

1.4.1 แป้งที่ใช้ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง

1.4.2 พลาสติกไซเซอรที่ใช้ได้แก่ glycerol โดยใช้อัตราส่วนระหว่างแป้งกับ glycerol เท่ากับ 3 : 1

1.4.3 สารเติมแต่งประเภทสารเพิ่มความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ใช้ ได้แก่ ยาง มี 3 ชนิด คือ ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR), hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH), และ polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA)

1.4.4 ทดสอบสมบัติเชิงกลโดยใช้การทดสอบแรงดึงยืดและการทดสอบแรงกระแทก

1.4.5 ทดสอบสมบัติทางความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53%

1.4.6 ทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยาโดยใช้เทคนิค scanning electron microscopy (SEM)

#### 1.5 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

1.5.1 หาข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง รวมทั้งจัดซื้อสารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

1.5.3 ดำเนินงานวิจัย

1.5.3.1 ทดลองเตรียม TPS จากยางที่ถูกดัดแปรผสมกับแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งใน ส่วนของ ENR-OH จะทำการสังเคราะห์ขึ้นมาจาก NR ในขณะที่ PI-g-MA จะได้จากการ สังเคราะห์

1.5.3.2 เตรียม TPS ที่มีส่วนผสมของสารเติมแต่งซึ่งก็คือยางธรรมชาติและยาง ธรรมชาติที่ถูกดัดแปร ได้แก่ NR, ENR-OH, และ PI-g-MA ตามลำดับ โดยมีการปรับปริมาณ ที่ระดับต่าง ๆ จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่อง compression molding แล้วศึกษาสมบัติเชิงกล ของ TPS ที่ระบบต่าง ๆ

1.5.3.3 พิสูจน์เอกลักษณ์ต่าง ๆ ของ TPS ที่เตรียมได้นอกจากสมบัติเชิงกล ได้แก่ พฤติกรรมการดูดความชื้นและลักษณะทางพื้นผิวรอยแตกหักของชิ้นงานแต่ละระบบ

1.5.4 วิเคราะห์ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.5.5 สรุปผลการวิจัย

1.5.6 เขียนรายงานผลการวิจัย

## 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถเตรียม TPS โดยใช้ยางที่ถูกดัดแปรเป็นสารเติมแต่งได้

1.6.2 ได้ทราบอิทธิพลของชนิดของยางที่มีต่อสมบัติเชิงกล, สมบัติทางความชื้น, และ สมบัติทางสัณฐานวิทยาของ TPS ที่เตรียมได้

1.6.3 เป็นแนวทางการนำพลาสติกจากแป้งไปใช้ประโยชน์ที่สามารถทดแทนการใช้ พลาสติกสังเคราะห์ได้

1.6.4 เป็นข้อมูลในการพัฒนาพลาสติกที่ย่อยสลายต่อไป

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว มนุษย์ได้รับแป้งจากแหล่งที่แตกต่างกันตามภูมิประเทศในโลก ทางด้านทวีปอเมริกาเหนือหรืออเมริกากลางจะมีข้าวโพดและข้าวสาลีเป็นแหล่งให้แป้งที่สำคัญ ส่วนทางด้านยุโรปจะมีมันฝรั่ง ในขณะที่แถบเอเชียและแอฟริกาจะมีข้าวและมันสำปะหลัง เป็นต้น แต่แป้งที่สำคัญที่มีการใช้กันทั่วโลก คือ แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวสาลีและแป้งมันสำปะหลัง แป้งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในโภชนาการของมนุษย์ อาหารทั้งหมดส่วนใหญ่จะมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักของทุกชนชาติ เช่น ข้าว ขนมปัง ก๋วยเตี๋ยว และพาสต้า เป็นต้น

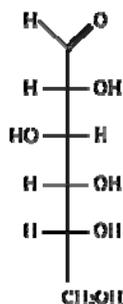
คำว่า “แป้ง” ในการผลิตนั้น หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ อยู่ในปริมาณน้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อยู่มาก จะเรียกว่า ฟลาว์ (flour) ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี ถ้ายังมีส่วนประกอบของโปรตีนสูงจะจัดอยู่ในประเภทฟลาว์ เรียกว่า corn flour, wheat flour เช่นเดียวกับแป้งข้าวเจ้าที่ยังมีโปรตีน 7-8 % จะเรียกว่า rice flour แต่เมื่อสิ่งเจือปนอันหมายถึงโปรตีน ไขมัน เกลือแร่อื่น ๆ ถูกสกัดออกไป จนเหลือแต่แป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จะเรียกว่า แป้งสตาร์ช (starch) เช่น corn starch เป็นต้น สำหรับแป้งมันสำปะหลังที่ผลิตในประเทศไทย ปัจจุบันผลิตด้วยวิธีที่ทันสมัยทำให้มีความบริสุทธิ์สูงจึงจัดเป็นแป้งสตาร์ช (cassava starch) แป้งที่บริสุทธิ์สูงเหล่านี้จึงถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในรูปของสารเคมีในการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ มากมาย ในบางครั้งจะเรียกแป้งสตาร์ชที่ยังไม่ได้ถูกทำการคัดแปรหรือแปรรูปว่า แป้งดิบ (raw starch หรือ native starch) ซึ่งจะตรงกันข้ามกับแป้งที่ถูกคัดแปรแล้วที่เรียกว่า โมดิไฟด์สตาร์ช (modified starch)

รูปแบบการใช้ประโยชน์จากแป้งในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา อุตสาหกรรมหนึ่งในปัจจุบันอาจแทนที่ด้วยอุตสาหกรรมที่กำลังพัฒนาต่อไปในอนาคตได้ การคิดค้นใหม่ ๆ ทำให้เกิดความต้องการแป้งชนิดใหม่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ ทำให้มีความต้องการแป้งที่มีขนาดเล็กและมีปริมาณอะไมโลสสูง และเกิดความพยายามที่

จะแสวงหาแป้งชนิดใหม่ ๆ ที่มีสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการหรือมีการพยายามใช้เทคนิคต่าง ๆ ทางชีวเคมี พันธุวิศวกรรมเพื่อทำการตัดแปรแป้งหรือพืชนั้น ๆ ทำให้เกิดความก้าวหน้าทางวิชาการมากขึ้น [4]

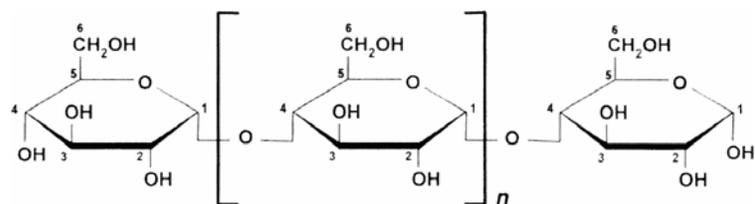
### 2.1.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นพอลิเมอร์ที่มีหน่วยซ้ำของ D-glucose ดังรูปที่ 2.1 เป็นองค์ประกอบในแต่ละโมเลกุลของแป้ง (ที่ประกอบไปด้วยทั้งส่วนที่เป็น amorphous และ crystalline) แป้งที่พบมากในพืชทั่วไป อาจจำแนกเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด ได้แก่ พอลิเมอร์เชิงเส้นที่เรียกว่า อะไมโลส (amylose) และพอลิเมอร์เชิงกิ่งที่เรียกว่า อะไมโลเพคติน (amylopectin) แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของปริมาณอะไมโลสกับอะไมโลเพคตินที่แตกต่างกันและทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกันด้วย ในแป้งโดยทั่วไปจะพบอัตราส่วนของปริมาณอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินที่ประมาณ 25 ต่อ 75 [4, 5]



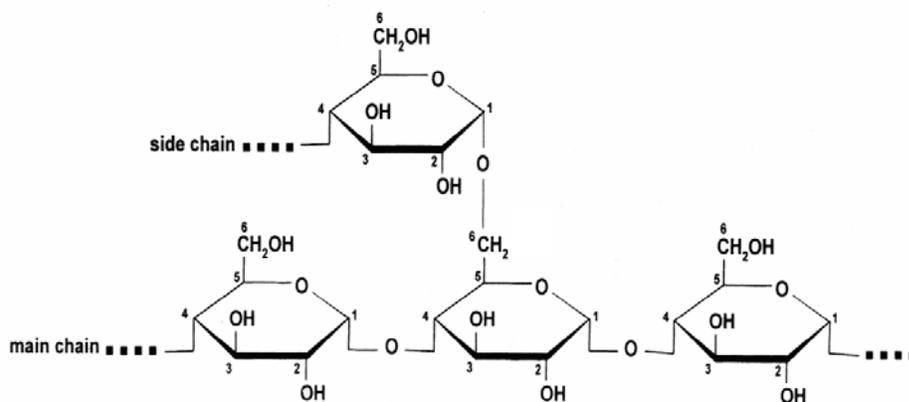
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ D-glucose [5]

อะไมโลส คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยหน่วยซ้ำของ D-glucose ที่มีปริมาณของกิ่งอยู่น้อยมาก (มีอัตราส่วนระหว่างจำนวนพันธะที่เชื่อมต่อระหว่างหน่วยซ้ำใน main chain ต่อจำนวนพันธะที่เชื่อมต่อระหว่างหน่วยซ้ำกับกิ่งเท่ากับ 99 ต่อ 1 [6]) โดยมีพันธะเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ภายใน main chain คือ  $\alpha$  (1,4) glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.2 โดยมีค่าน้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ประมาณ  $10^5$  โครงสร้างในสามมิติหรือ stereoregularity สามารถที่จะเกิดในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับ complexing agents อื่น ๆ ได้ เช่น ไขมัน หรือ ไอโอดีน อะไมโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน สามารถใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะไมโลสได้

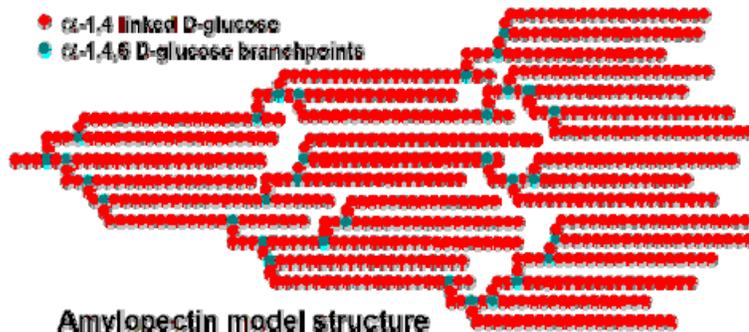


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส [4]

อะไมโลเพกทิน คือพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของ D-glucose เช่นเดียวกัน แต่มีปริมาณกิ่งที่มากกว่า ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha(1,4)$  glucosidic linkage ส่วนพันธะที่เชื่อมต่อกิ่งกับสายโซ่หลักคือ  $\alpha(1,6)$  glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.3 โดยโมเลกุลของอะไมโลเพกทินมีน้ำหนักที่  $5 \times 10^6$  โครงสร้างที่เป็นขอมรับมากที่สุดคือ cluster type ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลเพกทิน [4]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดแบบ cluster ของ amylopectin [7]

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับเรื่องแป้งเพื่อเตรียมเป็นวัสดุประเภทใหม่ สามารถแบ่งออกได้ทั้งหมด 3 ประเภท ดังนี้

1. แป้งสามารถที่จะถูกนำมาทำเป็นสารเติมแต่ง (filler) ในกระบวนการผสมเข้ากับพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยทั่วไปที่ใช้คือ พอลิเอทิลีน พบว่าเมื่อนำมาผสมแล้วจะมีความสามารถที่จะถูกย่อยโดยกระบวนการทางชีวภาพ (biofragmentability) ของผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้น เนื่องจากเอนไซม์สามารถเข้าถึงอนุภาคแป้งได้
2. ต่อมาได้มีพัฒนาการวิจัยโดยการนำแป้งมาทำ mix extrusion กับพอลิเมอร์สังเคราะห์ แป้งมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature:  $T_g$ ) ของแป้งเดิมที่เมื่ออยู่ในสถานะแห้งจะมีค่าสูงกว่าช่วงอุณหภูมิการสลายตัว (decomposition temperature,  $T_d$ ) แต่เมื่อเติมน้ำซึ่งจัดเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับพอลิแซคคาไรด์ จะสามารถลดค่า  $T_g$  ของแป้งได้ดีมาก โดยแป้งที่นำมาอัดรีดนั้นได้มีการทดลองเติมพลาสติกไซเซอร์ชนิดต่าง ๆ ลงไป พบว่าจะมีการหลอมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวเกิดขึ้น จากนั้นก็ทำการอัดรีดออกมาสู่แม่พิมพ์ แต่ปัญหาหลักที่พบเมื่อทำในลักษณะนี้คือ ปัญหาในเรื่องความไม่เข้ากันกับพอลิเมอร์สังเคราะห์เนื่องจากความเป็นขี้ของอนุภาคแป้ง ทำให้เกิดการแยกเฟสเมื่อทิ้งให้ชิ้นงานเย็นตัวลง ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาในรูปแบบของโคพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยนำพอลิเมอร์สังเคราะห์มาทำโคพอลิเมอร์เซชันกับแป้งมากขึ้น แต่โคพอลิเมอร์สังเคราะห์ดังกล่าวยังมีขีดจำกัดในเรื่องของราคาที่สูง ดังนั้นการผสม (blends) จึงได้รับความนิยมมากกว่าโดยผสมส่วนของพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีส่วนของ hydrophilic ลงไปด้วย พอลิเมอร์เหล่านั้นได้แก่ poly(lactic acid), PLA, poly(vinyl alcohol), PVA, poly hydroxybutyrate, PHB, และ poly(caprolactone), PCL

3. แนวทางสุดท้ายในการพัฒนาวัสดุที่เตรียมจากแป้งคือ การอัดรีดแป้งในลักษณะเดียวกับวัสดุเทอร์โมพลาสติกทั่วไป แต่เนื่องจากในความเป็นจริง อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature:  $T_m$ ) ของแป้งปกติจะมีค่าสูงกว่าช่วงอุณหภูมิการสลายตัว ดังนั้นเนื้อแป้งเพียงอย่างเดียวจึงไม่สามารถจัดว่าเป็นเทอร์โมพลาสติกได้ กลุ่มนักวิจัยจึงมุ่งเน้นในเรื่องการเติมพลาสติกไซเซอ์ลงไปเพื่อทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของแป้งต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัว และสามารถขึ้นรูปได้ภายใต้สภาวะที่ได้รับอุณหภูมิและแรงเสียดสี (shear force) เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกพลาสติกทั่วไป โดยมีการใช้พลาสติกไซเซอ์ประเภทต่าง ๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของวัสดุจำพวกนี้ เช่น กลีเซอรอล น้ำ ยูเรีย และ พอร์มาไมด์ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อลดแรงดึงดูระหว่างสายโซ่ของแป้งอันเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจน และเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ อย่างไรก็ตาม พลาสติกที่เตรียมจากแป้งดังกล่าวจะมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำและว่องไวต่อความชื้น ตลอดจนมีขีดจำกัดในการนำมาใช้งานที่แคบอีกด้วย และจากตัวอย่างข้างต้นของพลาสติกไซเซอ์ส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่มีความเป็นขั้ว (hydrophilic material) จึงสามารถถูกชะล้างด้วยน้ำได้ ดังนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าไปในแป้งในระหว่างกระบวนการอัดรีด การระเหยขององค์ประกอบน้ำที่ยังไม่เข้าสู่สมดุลในระหว่างอายุการใช้งานของวัสดุ อาจส่งผลให้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ลดลงได้ เช่น มีความเปราะสูง นอกจากนี้ยังมีข้อเสียอีกในเรื่องของธรรมชาติของแป้งที่ชอบน้ำ ค่า  $T_g$  จึงมีความว่องไวต่อปริมาณของน้ำ สมบัติเชิงกลของวัสดุประเภทนี้จึงขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ในสภาวะอากาศอีกเช่นกัน [8]

ตารางที่ 2.1 ปริมาณอะไมโลสและปริมาณอะไมโลเพกทินที่พบในแป้งแต่ละชนิด [4]

ชนิดของแป้ง	% อะไมโลส	% อะไมโลเพกทิน
แป้งข้าวเจ้า	17	83
แป้งข้าวเหนียว	0-2	98-100
แป้งมันสำปะหลัง	17	83

### 2.1.2 คุณสมบัติบางประการของเม็ดแป้ง

ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติสำคัญ 2 ประการ ได้แก่ การเกิดเจลลิตินเซชัน และการเกิดรีโทรเกรเดชัน ดังต่อไปนี้

#### - การเกิดเจลลิตินเซชัน (gelatinization)

การเกิดเจลลิตินเซชันเป็นการทำให้โมเลกุลของแป้งเกิดการคลายตัวหรือพองตัว โดยปกติโมเลกุลของแป้งจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในลักษณะร่างแห micelles ดังนั้นการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้น้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัว เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลืออยู่น้อย ทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นส่งผลให้เกิดความหนืด ซึ่งเรียกกันว่า เกิดเจลลิตินเซชัน (gelatinization) แบ่งเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่าง micelles ยึดหยุ่นได้อย่างจำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ต่อมาเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับสารละลายน้ำแป้งจนถึงอุณหภูมิที่เม็ดแป้งสามารถพองตัวอย่างรวดเร็ว เม็ดแป้งจะเข้าสู่ระยะที่สอง คือ จะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแห micelles ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนตัวลงเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย ส่งผลทำให้เม็ดแป้งดูดซึมน้ำได้มากขึ้นและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ ความหนืดของน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้เริ่มจะละลายออก เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกระยะหนึ่งจนเข้าสู่ระยะที่สาม ผลที่ตามมาคือ รูปร่างของเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นตัวลงจะเกิดเจล การเกิดเจลลิตินเซชันของแป้งทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีอื่น ๆ ได้ดี [4]

#### - การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดพองตัวเต็มที่แล้วแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กระยะจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้แป้งเย็นตัว โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดซึมน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเป็นเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน

ชั้น (retrogradation) หรือการคืนตัว (setback) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นหนามากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาออกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดมากขึ้น

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจลและโมเลกุลของน้ำถูกบีบออกมาออกเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมโลส อะไมโลเพกทินและองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในแป้ง ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งจะสามารถคืนตัวได้ดี นอกจากนี้ในช่วง pH เท่ากับ 5 ถึง 7 แป้งจะสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้ แป้งจะคืนตัวได้ช้าลง ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพกทินสูง อัตราในการคืนตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) ที่องศาอิสระของการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization) ของอะไมโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะไมโลสยาวหรือสั้นกว่า ในการทำให้อะไมโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งจะต้องใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 100 ถึง 600 °C อะไมโลเพกทินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน ในแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวจะมีอัตราการคืนตัวของแป้งที่ต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีอะไมโลสในแป้งชนิดนี้ สำหรับแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะมีอัตราการคืนตัวสูงกว่าแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง เนื่องมาจากในแป้งธัญพืชมีปริมาณอะไมโลสสูง (ประมาณ 28 %) มีอะไมโลสขนาดเล็กและมีไขมันในปริมาณสูงทำให้เกิดการจับตัวเป็น amylase-lipid complex [4]

## 2.2 ความหมายของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง

เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) เป็นพลาสติกที่แข็งตัวโดยไม่อาศัยปฏิกิริยาทางเคมี แต่อาศัยคุณสมบัติทางกายภาพ เมื่อทำพลาสติกชนิดนี้ให้ร้อนขึ้นแล้วเทลงในแม่พิมพ์หรือแบบ ก็จะเปลี่ยนรูปร่างไปตามแบบนั้น และเมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัวคงรูปอยู่ได้ เมื่อเป็นรูปชิ้นงานแล้วสามารถที่จะหลอมและเปลี่ยนรูปเป็นอย่างอื่นได้อีก เพราะคุณสมบัติทางเคมียังคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง [1]

เมื่อรวมคำระหว่างคำว่า “เทอร์โมพลาสติก” กับ “แป้ง” จะกลายเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch, TPS) หรือเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง ซึ่งได้จากแป้งที่บริสุทธิ์สูงจากธรรมชาติที่ถูกแยกออกมาผสมกับพลาสติกไซเซออร์ที่มีความจำเพาะที่สามารถเกิดพันธะกับแป้งได้ จากนั้นมีการให้พลังงานกลและพลังงานความร้อนเพื่อให้กลายเป็นพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง [4] โดยในระหว่างการขึ้นรูปพลาสติกชนิดนี้ พลาสติกไซเซออร์เป็นสิ่งจำเป็นมาก เนื่องจากพลาสติกไซเซออร์จะสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งแทนที่พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งกับแป้งเอง เพื่อเป็นการลดคุณสมบัติหลอมเหลวให้ต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัว ตัวอย่างของพลาสติกไซเซออร์ประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ผสมกับแป้ง ได้แก่ กลีเซอรอล น้ำ ยูเรีย และฟอร์มามิด์ นอกจากนี้จะมีจุดมุ่งหมายเพื่อลดแรงดึงดูระหว่างสายโซ่ของแป้งแล้ว ยังช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ด้วย [8] ข้อดีของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง คือสามารถย่อยสลายได้ง่ายนอกจากจะสามารถขึ้นรูปใหม่ได้เหมือนเทอร์โมพลาสติกทั่วไป ดังนั้นจึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม ผลกระทบที่ได้จากพลาสติกชนิดนี้ ส่วนใหญ่จะเป็นพวกบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับสุขภาพ อาหารและอุปกรณ์พิเศษอื่นๆ [9]

การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชวิธีหนึ่งที่สามารถใช้เตรียมในห้องปฏิบัติการได้ดีคือวิธีของ A.J.F. Carvalho และคณะ [10] โดยนำแป้งผสมกับกลีเซอรอลในถุง polyethylene จากนั้นทิ้งไว้หนึ่งคืนเพื่อให้กลีเซอรอลกระจายตัวได้อย่างเต็มที่ จากนั้นนำสารผสมดังกล่าวเข้าผสมในเครื่อง Haake Rheomix 600 batch mixer ที่ต่อกับ roller rotors ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 50 rpm ที่อุณหภูมิ 150-160 °C เป็นเวลา 6 นาที ก็จะได้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากนั้นจึงนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยวิธีการกดอัด (compression) ที่อุณหภูมิ 160 °C สำหรับใช้ในการทดสอบต่อไป

### ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

พลาสติกย่อยสลายได้แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่

#### - พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง

พลาสติกประเภทนี้เกิดจากการนำวัสดุจำพวกแป้งมาผสมกับพลาสติกทั่วไปมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติก เมื่อผลิตภัณฑ์ถูกแสงอัลตราไวโอเล็ต แป้งซึ่งเป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์จะสลายตัวก่อนซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์สลายตัวออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ แต่ส่วนที่เป็นพลาสติกจะยังไม่ย่อยสลาย ดังนั้นพลาสติกประเภทย่อยสลายด้วยแสงนี้ยังคงไม่สามารถย่อยสลายได้ทั้งหมด

### - พลาสติกย่อยสลายด้วยกระบวนการชีวเคมี

พลาสติกประเภทนี้เกิดจากการนำวัสดุธรรมชาติ เช่น แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น มาผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อให้โครงสร้างทางเคมีเรียงตัวกันคล้ายกับโครงสร้างทางเคมีของพลาสติก ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากวัสดุดังกล่าวจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงในสมบัติก่อนการนำมาใช้ แต่เมื่อผ่านการใช้งานและทิ้งผลิตภัณฑ์รวมไปกับขยะประเภทอื่น ๆ จะสามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ [1]

### 2.3 พลาสติกไซเซอร

พลาสติกไซเซอรเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง เนื่องจากลักษณะโครงสร้างภายในโมเลกุลของแป้งประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งก่อให้เกิดพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลขึ้น จึงทำให้โมเลกุลของแป้งมีความแข็งแรงมาก ส่งผลทำให้แป้งมี glass transition temperature ( $T_g$ ) และ melting temperature ( $T_m$ ) สูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัว เพื่อลดอุณหภูมิ  $T_g$  และ  $T_m$  จึงต้องมีการใส่พลาสติกไซเซอรลงไป แป้งเพื่อสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้ง เมื่อพลาสติกไซเซอรสร้างพันธะกับโมเลกุลของแป้งแล้วจะทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งถูกทำลาย ส่งผลให้แป้งมีความนุ่มและสามารถนำไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ ได้อย่างง่าย สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น พลาสติกไซเซอรหลักที่ใช้ในการผลิตเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง ได้แก่ กลีเซอรอล เนื่องจากโมเลกุลมีขนาดเล็ก จึงสามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างโมเลกุลของแป้งแล้วสร้างพันธะกับโมเลกุลของแป้งได้ดี ส่วนสารอื่น ๆ ที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอร เช่น ซอร์บิทอล ยูเรีย เอทิลีนไกลคอล และน้ำตาลอื่น ๆ ก็สามารถใช้งานได้ดีพอสมควร แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ขึ้นอยู่กับสัดส่วน น้ำหนักโมเลกุลและลักษณะทางเคมีของพลาสติกไซเซอรแต่ละชนิดด้วย [11, 12]

ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวกับพลาสติกไซเซอรที่ใช้ในการเตรียม thermoplastic starch (TPS) เช่น งานวิจัยของ A.L. Da Roz และคณะ [11] ที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของชนิดและปริมาณพลาสติกไซเซอรที่ใช้ในการเตรียม TPS ด้วยกระบวนการหลอมเหลว (melt process) ต่อสมบัติทางความร้อน, ทางกล, และพฤติกรรมการดูดซับน้ำ พบว่า การใช้ monohydroxyl alcohol และ glycol ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ ไม่มีความเหมาะสมในการใช้เป็นพลาสติกไซเซอร เนื่องจากไม่สามารถทำลายพันธะไฮโดรเจนและแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างโมเลกุลของแป้งได้ แต่ในกรณีของ glycol ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะสามารถใช้เป็นพลาสติกไซเซอรได้ ในส่วนพฤติกรรมการดูดซับน้ำจะแปรผันตรงกับปริมาณของพลาสติกไซเซอร งานวิจัยนี้ยังได้ข้อสรุปที่สำคัญคือ สารที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมากอยู่ในโมเลกุลจะสามารถใช้เป็นพลาสติกไซเซอรสำหรับเตรียม TPS ด้วย

กระบวนการหลอมเหลวได้ ส่วนงานวิจัยของ Chang-hyeon Kim และคณะ [13] ซึ่งศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของ พลาสติกไซเซออร์ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่มีส่วนผสมของแป้งซึ่งพลาสติกไซเซออร์ที่ใช้คือ polyethylene glycol (PEG) พบว่า น้ำหนักโมเลกุลมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้เป็นอย่างมาก พลาสติกไซเซออร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเกินไปจะส่งผลให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง ทำให้ไม่สามารถเข้ากันได้กับแป้ง ความเปราะมีค่าสูงขึ้นเนื่องมาจากความเป็นขั้วของ PEG มีค่าลดลง

#### 2.4 ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปร

ยางเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเด่นหลายประการที่วัสดุอื่นไม่สามารถเทียบเคียงได้ โดยเฉพาะสมบัติความยืดหยุ่น (elasticity) คือ เมื่อให้แรงดึงยางจะสามารถยืดตัวได้หลายเท่าของความยาวเดิม และเมื่อปล่อยแรงออกยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและความยาวเดิม นอกจากนี้ยางยังมีสมบัติเด่นอื่น ๆ เช่น มีความเหนียว (toughness) และความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ มีความสามารถในการยึดติดกับวัสดุอื่นดี เช่น โลหะและสิ่งทอ (เส้นใย ผ้าใบ ฯลฯ) ทำให้สามารถนำไปใช้ในงานวิศวกรรมได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น

ยางแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลัก ๆ ได้แก่ ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ในส่วนของงานวิจัยนี้ จะกล่าวถึงยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรอีก 2 ชนิด ได้แก่ Epoxidized Natural Rubber (ENR) และ Polyisoprene-*graft*-maleic anhydride (PI-g-MA)

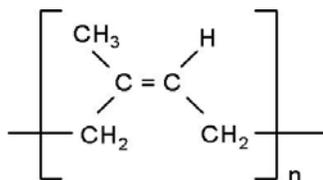
##### 2.4.1 ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR)

ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) ส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30 % แฉวนลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 % เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยางและถุงยางอนามัย เป็นต้น แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นรีดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 °C เป็นเวลา 3 วัน ก็จะได้ยางแผ่นรมควัน [14]



รูปที่ 2.5 น้ำยางที่ได้จากต้นยางพารา (*Hevea brazilliensis*) [15, 16]

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ *cis*-1,4-polyisoprene กล่าวคือ มีโครงสร้างแบบ isoprene ( $C_5H_8$ ) ดังรูปที่ 2.6 โดยที่  $n$  มีค่าตั้งแต่ 15 ถึง 20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวได้ค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด ทำให้สามารถเกิดผลึกได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง [14]



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ (*cis*-1,4-polyisoprene) [14]

ลักษณะเด่นอีกอย่างของธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับมันหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติเชื่อมด้านการเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (assemble) ชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน

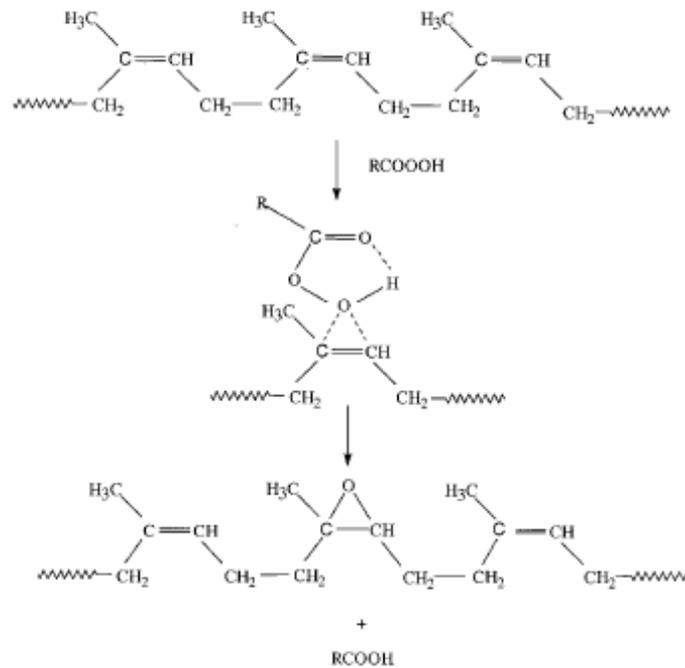
เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิเป็น อย่างมาก กล่าวคือ ยางจะอ่อนเềmและเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผง เชมดำ และสารตัวเร่งต่าง ๆ เป็นต้น [14]

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และ ความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (double bond) อยู่มาก ทำให้ยางว่องไว ต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารในกลุ่มของ antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อ สารละลายไม่มีขี้ น้ำมันและสารเคมีต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับ สารต่าง ๆ ดังกล่าวได้ [14]

ในส่วนของ การเตรียมยางธรรมชาติเหลว (liquid natural rubber : LNR) ทำได้โดย การนำยางธรรมชาติมาทำให้โมเลกุลของยางเกิดการสลายตัวตรงตำแหน่งพันธะคู่ หรือเป็น กระบวนการตัดสายโซ่โมเลกุลของ polyisoprene ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงให้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง จนกระทั่งยางมีความหนืดต่ำ สามารถไหลได้ที่อุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C สามารถเตรียมได้ทั้งในรูปของน้ำยางและยางแห้ง [14]

#### 2.4.2 ยางธรรมชาติที่มีหมู่อีพอกไซด์อยู่บนโมเลกุล (epoxidized natural rubber, ENR)

ENR เป็นยางที่ได้จากการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางธรรมชาติตรง บริเวณพันธะคู่เกิดเป็นวง epoxide โดยผ่านปฏิกิริยาที่เรียกว่า อีพอกซิเดชัน (epoxidation) โดยมี ระดับของการเกิด epoxidation ตั้งแต่ร้อยละ 10-50 ยาง ENR ที่ได้จึงมีความเป็นขี้สูงกว่ายาง ธรรมชาติทั่วไป ทำให้ทนต่อความร้อนและน้ำมันได้ดีขึ้น กระบวนการ epoxidation สามารถทำ ได้ทั้งในรูปของสารละลายและ latex โดย Gelling พบว่า peracetic acid มีประสิทธิภาพในการ ทำให้เกิดปฏิกิริยา epoxidation ของ NR latex และสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาเปิดวง (ring-opening reaction) ที่มักจะเกิดเป็น side reaction ได้โดยการปรับความเข้มข้นของกรดและอนุมูล ในการเกิดปฏิกิริยาให้เหมาะสม [17] สารที่นิยมนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยา epoxidation กับ น้ำยางธรรมชาติ คือ สารประเภท peracid เนื่องจากมีความเข้ากันได้กับระบบที่เป็นน้ำ (aqueous) ปฏิกิริยา epoxidation ถูกคาดว่าเกิดผ่าน transition state ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ปฏิกริยา epoxidation ระหว่างยางธรรมชาติกับ peracid [18]

ในการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางธรรมชาติจะทำให้ค่า  $T_g$  ของ ENR เพิ่มขึ้นตาม mol% ที่เข้าทำปฏิกิริยา  $T_g$  มีค่าสูงขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลบางอย่างของ ENR เช่น tensile properties, damping properties และ fatigue behavior มีการเปลี่ยนแปลงในทางที่ดีขึ้น การเพิ่มระดับของการเกิดปฏิกิริยา epoxidation จะทำให้สมบัติทางกายภาพของ ENR เปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะเพิ่มความเหนียวและค่า  $T_g$  โดยค่า  $T_g$  จะเพิ่มขึ้น  $1^\circ\text{C}$  เมื่อมีการเพิ่ม ทุก ๆ 1 mol% ของการเกิดปฏิกิริยา epoxidation และเนื่องจาก ENR มีหมู่ epoxide อยู่ในลักษณะเป็นวงสามเหลี่ยม (three-membered rings) ในโมเลกุล ทำให้มีความว่องไวต่อการเข้าทำปฏิกิริยามาก จึงสามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดหรือเบสช่วยในการเปิดวงได้ง่าย [18]

#### 2.4.3 polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA)

ยางไอโซพรีน (isoprene rubber, IR) เกิดจากความพยายามที่จะสังเคราะห์ยางที่มีสมบัติและโครงสร้างเหมือนกับยางธรรมชาติ ในปี ค.ศ. 1954 Goodrich ได้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ยาง IR จากไอโซพรีนโมโนเมอร์ (isoprene monomer) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันชนิด Ziegler-Natta และได้ตั้งชื่อยางชนิดนี้ว่า “synthetic natural rubber” ปฏิกริยาโดยย่อแสดงดังรูปที่ 2.8 อย่างไรก็ตาม ยาง IR มีสมบัติเชิงกล เช่น ความทนทานต่อแรง

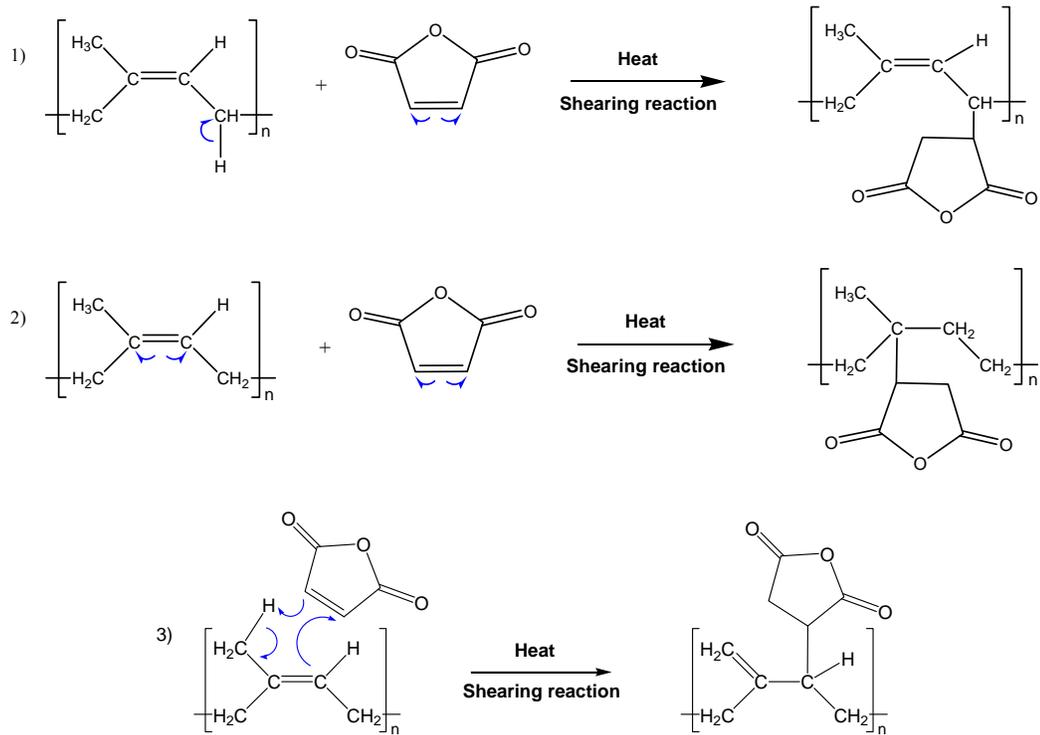
ดิ่งต่ำกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย และราคาก็สูงกว่า แต่มีข้อดีคือ คุณภาพของยางสม่ำเสมอ มีสิ่งเจือปนน้อย ทำให้ยางมีสีขาวสวย (ในขณะที่ยางธรรมชาติจะมีสีเหลืองอ่อนถึงน้ำตาลเข้ม เนื่องจากมีสารเบต้าแคโรทีน ( $\beta$ -carotene)) บางครั้งจะใช้ยาง IR แทนยางธรรมชาติในการผลิตยางหุ้มและอุปกรณ์การแพทย์บางชนิด



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ polyisoprene [19]

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของยางธรรมชาติและยาง IR จะพบว่า มีโครงสร้างคล้ายกันมาก ซึ่งลักษณะเด่นคือ จะมีพันธะคู่ทุก ๆ คาร์บอน 5 อะตอม ดังนั้นตำแหน่งนี้สามารถทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดโคพอลิเมอร์หรือการต่อกิ่ง (branching) ได้ นอกจากนี้หมู่เมทิลที่ติดอยู่ระหว่างคาร์บอนที่ตำแหน่งพันธะคู่ยังมีส่วนช่วยในการเพิ่มความว่องไวต่อปฏิกิริยาได้ดีเมื่อเทียบกับ polybutadiene หรือ styrene-butadiene rubber (SBR) กระบวนการที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติและยาง IR มีหลายกระบวนการด้วยกัน เช่น chlorinated, hydrochlorinated, methylmethacrylate grafted และ epoxidation เป็นต้น [19]

ในส่วนของ maleic anhydride นั้น เป็นสารที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีเป็นอย่างมาก โดยส่วนของพันธะคู่ที่ตำแหน่งคาร์บอนกับคาร์บอนจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารไฮโดรคาร์บอนที่ตำแหน่งพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวได้เป็นอย่างดี เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวก peroxide [20] โดยหลักการนี้ ปฏิกิริยาของยางธรรมชาติเหลวกับ maleic anhydride สามารถเกิดได้และให้สารผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเป็นสารยึดติด (adhesive) ปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งมีความเป็นไปได้ของการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ 3 แบบด้วยกัน



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติเหลวกับ maleic anhydride [21]

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

##### เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

1. เครื่องอบสูญญากาศ (vacuum oven) [EYELA, VOS-301SD]
2. เครื่องผสมภายใน (internal mixer) [BRABENDER, 30/50 EHT]
3. เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (compression molding) [CARVER, 2518]

##### เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่องมือทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยึดคอนเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) [LLOYD Instruments UK, LR 50 K]
2. เครื่องมือทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Tester) [Zwick, B5102.202 Charpy Pendulum 4J]
3. เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) [BRUKER, VERTEX 70]
4. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer, NMR) [BRUKER, AVANCE 300]
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) [CamScan, MX-2000]

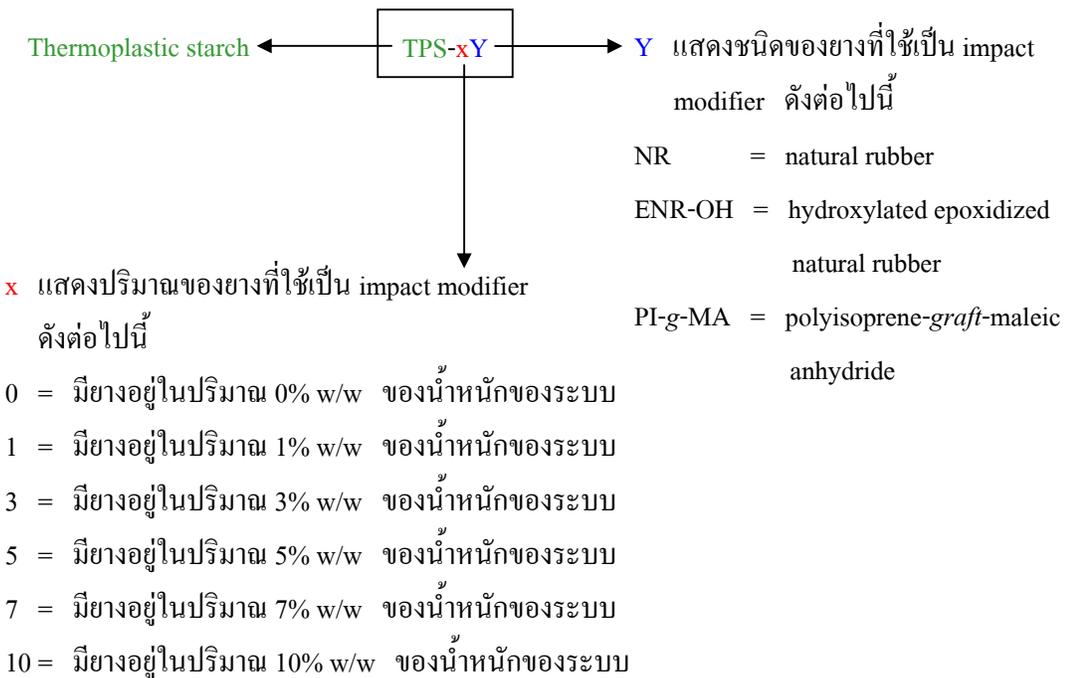
##### สารเคมี

1. แป้งมันสำปะหลัง (tapioca flour) [โรงงานแป้งมัน ไทยท่า ชลบุรี]
2. glycerol [Scharlau, reagent grade]
3. magnesium nitrate ( $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) [Scharlau, reagent grade]
4. tetrahydrofuran (THF) [Reagent chemical industry, commercial grade]
5. น้ำยางเข้มข้น 60% w/w DRC (high ammonia natural rubber latex) [สถาบันวิจัยยาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน]
6. Igepal CO-890 (poly(oxy-1,2-ethanedily)) [Rodia Inc.]

7. formic acid 90% [Univar, reagent grade]
8. hydrogen peroxide 35% [UNILAB, reagent grade]
9. methanol 99% [Union Intraco, commercial grade]
10. hydrochloric acid 37% (HCl) [LAB-SCAN, reagent grade]
11. toluene [Reagent chemical industry, commercial grade]
12. deuterated chloroform (deuteriochloroform,  $\text{CDCl}_3$ ) [Wilmad Labgrass]

### ดัชนีอักษรย่อ

เนื่องจากว่าในงานวิจัยนี้มีการใช้อักษรย่ออยู่บางส่วน ดังนั้นเพื่อให้สามารถเข้าใจเนื้อหาในงานวิจัยได้ง่ายยิ่งขึ้น จึงจำเป็นต้องกล่าวถึงหลักการโดยทั่วไปของการใช้อักษรย่อไว้ดังนี้



ตัวอย่างเช่น TPS-3PI-g-MA หมายถึง TPS ที่มีปริมาณของ polyisoprene-graft-maleic anhydride ซึ่งใช้เป็น impact modifier อยู่ 3% w/w ของน้ำหนักของระบบ

### หมายเหตุ

TPS-ORB หมายถึง TPS ที่ไม่มียางอยู่ในระบบ ดังนั้นจึงใช้ตัวอักษรย่อสำหรับ TPS ในระบบนี้อีก 3 ชื่อ ได้แก่ TPS-0NR, TPS-0ENR-OH, และ TPS-0PI-g-MA

## วิธีดำเนินงานวิจัย

### ตอนที่ 1 การเตรียมแป้งและการสังเคราะห์ยางชนิดต่าง ๆ

#### 1. การเตรียมแป้งก่อนทำการผสม

นำแป้งมันสำปะหลัง 1 ถุง (980 g) ใส่ลงในภาชนะสำหรับอบสารขนาด 27.5 x 40.0 x 4.5 cm<sup>3</sup> เกลี่ยให้เนื้อแป้งกระจายตัวทั่วภาชนะดังกล่าว ดังรูปที่ 3.1 จากนั้นนำเข้าตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลาประมาณ 72 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออก ในระหว่างอบช่วงแรกจะพบว่ามือน้ำข้างภายในตู้อบเป็นปริมาณมาก จึงควรจะมีการเปิดตู้อบออกแล้วนำผ้าแห้งเช็ดน้ำออกแล้วจึงทำการอบจนครบเวลา หลังจากอบครบกำหนด ให้นำแป้งที่ผ่านการอบมาเก็บไว้ในภาชนะปิดที่ภายในบรรจุสารดูดความชื้น (silica gel) เพื่อป้องกันการดูดความชื้นก่อนทำการผสม



รูปที่ 3.1 แป้งในภาชนะสำหรับอบแป้ง

#### 2. การเตรียมยางแห้งจากน้ำยางเข้มข้น 60% w/w DRC (dry rubber content)

นำน้ำยางเข้มข้น 60% w/w DRC (dry rubber content) มาตกตะกอนในเมทานอลตามปริมาณของยางแห้งที่ต้องการใช้ โดยการตกตะกอน 1 ครั้ง จะใช้น้ำยางประมาณ 100 ml ต่อเมทานอลประมาณ 500 ml จากนั้นนำยางที่ตกตะกอนแล้วไปล้างในน้ำกลั่นประมาณ 2-3 ครั้งเพื่อดึงเมทานอลที่หลงเหลือจากการตกตะกอน ในขณะที่ล้างควรจะรีดให้ยางเป็นแผ่นบาง ๆ เพื่อเป็นการช่วยกำจัดเมทานอลที่หลงเหลือและง่ายต่อการอบไล่ให้ได้อีกทางหนึ่ง จากนั้นนำยางที่ผ่านการกำจัดเมทานอลไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อให้ยางแห้ง โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้จากสีของยางที่เปลี่ยนไปจากสีขาวขุ่นเป็นสีเหลืองและมีลักษณะใส จากนั้นเก็บใส่ภาชนะปิดที่ภายในบรรจุสารดูดความชื้น (silica gel)

### 3. การเตรียมยางธรรมชาติที่มีหมู่ไฮดรอกซิลด้วยโซเดียมโพลีซัลไฟด์ผ่านการเปิดวงเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxylated epoxidized natural rubber, ENR-OH) จากน้ำยางเข้มข้น 60% w/w DRC

#### 3.1 การนำเอมโมเนียออกจากรubber น้ำยางเข้มข้น 60% w/w DRC

3.1.1 ชั่ง surfactant ซึ่งได้แก่ Igepal CO-890 น้ำหนัก 8.8 g ใส่ลงในบีกเกอร์ 500 ml จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาณ 185 ml แล้วให้ความร้อนเล็กน้อยและกวนสารละลายจน surfactant ละลายหมด

3.1.2 ชั่งน้ำยางเข้มข้น 185 g ลงในขวดก้นกลม 3 คอ ขนาด 1000 ml จากนั้นเติมสารละลายของ surfactant ที่เตรียมไว้ลงไปลงในขวดที่ใส่น้ำยางเข้มข้นจนหมด

3.1.3 ตั้งน้ำยางไว้ที่อุณหภูมิห้อง แล้วกวนด้วย magnetic bar เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดเอมโมเนีย

#### การคำนวณปริมาณของ surfactant ที่ใช้

- งานวิจัยนี้จะใช้ surfactant ในปริมาณ 8 phr ของระบบ

สารตั้งต้นซึ่งเป็นน้ำยางเข้มข้น 60% w/w DRC มีน้ำหนัก 185 g

จากความเข้มข้นของเนื้อยางเท่ากับ 60% w/w

ดังนั้น ต้องใช้ surfactant ในปริมาณเท่ากับ

$$185 \text{ g NRL} \left( \frac{60 \text{ g NR}}{100 \text{ g NRL}} \right) \left( \frac{8 \text{ g surfactant}}{100 \text{ g NR}} \right) = 8.88 \text{ g surfactant}$$

#### 3.2 การสังเคราะห์ยางธรรมชาติที่มีหมู่ไฮดรอกซิลด้วยโซเดียมโพลีซัลไฟด์ (epoxidized natural rubber, ENR)

3.2.1 นำยางที่ผ่านการกำจัดเอมโมเนียที่ยังอยู่ในขวดก้นกลมมาทำปฏิกิริยาต่อ โดยเริ่มต้นด้วยการให้อุณหภูมิกับระบบที่ 50 °C เมื่อระบบมีอุณหภูมิถึง 50 °C จะเริ่มใส่ formic acid จำนวน 20.9 ml

3.2.2 ค่อย ๆ หยด hydrogen peroxide จาก graduated funnel ในปริมาณ 417.29 ml ลงไปในระบบให้หมดภายในเวลา 30 – 45 นาที

3.2.3 หลังจากหยด hydrogen peroxide หมดแล้ว จึงตั้งปฏิกิริยาทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง 45 นาที จะได้สารละลายยาง ENR

3.2.4 นำสารละลายที่ได้มาตกตะกอนด้วยเมทานอล จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วรีดให้เป็นแผ่นบาง ๆ จากนั้นนำเข้าสู่อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลาประมาณ 72 ชั่วโมง เพื่อให้แห้งสนิท ก็จะได้ยาง ENR

การคำนวณปริมาณของ formic acid และ hydrogen peroxide ที่ใช้ในการเตรียม ENR

- งานวิจัยนี้จะใช้ 90% v/v formic acid ในอัตราส่วนโดยโมลของ formic acid ต่อ NR เท่ากับ 0.3 ต่อ 1

สารตั้งต้นซึ่งเป็นน้ำยางเข้มข้น 60% w/w DRC มีน้ำหนัก 185 g

ความเข้มข้นของเนื้อยางเท่ากับ 60% w/w

น้ำหนักโมเลกุลของหน่วยซ้ำของยาง NR เท่ากับ 68 g / mol

น้ำหนักโมเลกุลของ formic acid เท่ากับ 46.03 g / mol

ความหนาแน่นของ formic acid เท่ากับ 1.20 g / ml

ดังนั้น ต้องเตรียม formic acid ในปริมาณ เท่ากับ

$$185 \text{ g NRL} \left( \frac{60 \text{ g NR}}{100 \text{ g NRL}} \right) \left( \frac{1 \text{ mol NR}}{68 \text{ g NR}} \right) \left( \frac{0.3 \text{ mol formic acid}}{1 \text{ mol NR}} \right) \left( \frac{46.03 \text{ g formic acid}}{1 \text{ mol formic acid}} \right) \left( \frac{1 \text{ ml formic acid}}{1.20 \text{ g formic acid}} \right) \left( \frac{100 \text{ ml Soln formic acid}}{90 \text{ mol formic acid}} \right) = 20.90 \text{ ml Soln formic acid}$$

- งานวิจัยนี้จะใช้ 35% v/v hydrogen peroxide ในอัตราส่วนโดยโมลของ hydrogen peroxide ต่อ NR เท่ากับ 3 ต่อ 1

สารตั้งต้นซึ่งเป็นยางเข้มข้น 60% w/w DRC มีน้ำหนัก 185 g

ความเข้มข้นของเนื้อยางเท่ากับ 60% w/w

น้ำหนักโมเลกุลของหน่วยซ้ำของยาง NR เท่ากับ 68 g / mol

น้ำหนักโมเลกุลของ hydrogen peroxide เท่ากับ 34 g / mol

ความหนาแน่นของ hydrogen peroxide เท่ากับ 1.14 g / ml

ดังนั้น ต้องเตรียม hydrogen peroxide ในปริมาณ เท่ากับ

$$185 \text{ g NRL} \left( \frac{60 \text{ g NR}}{100 \text{ g NRL}} \right) \left( \frac{1 \text{ mol NR}}{68 \text{ g NR}} \right) \left( \frac{3 \text{ mol H}_2\text{O}_2}{1 \text{ mol NR}} \right) \left( \frac{34 \text{ g H}_2\text{O}_2}{1 \text{ mol H}_2\text{O}_2} \right) \\ \left( \frac{1 \text{ ml H}_2\text{O}_2}{1.14 \text{ g H}_2\text{O}_2} \right) \left( \frac{100 \text{ ml Soln H}_2\text{O}_2}{35 \text{ mol H}_2\text{O}_2} \right) = 417.29 \text{ ml Soln H}_2\text{O}_2$$

3.3 การสังเคราะห์ยางธรรมชาติที่หมู่ฟีนอกไซค์บน โมเลกุลผ่านการเปิดวงเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (*hydroxylated epoxidized natural rubber, ENR-OH*)

3.3.1 นำยาง ENR ที่แห้งน้ำหนัก 12.5 g ไปละลายใน THF ปริมาตร 560 ml ใน conical flask แล้วปิดด้วย stopper จากนั้นกวนด้วย magnetic bar จนกระทั่งยาง ENR ละลายใน THF จนหมด

3.3.2 นำสารละลาย ENR ใน THF มาทำปฏิกิริยากับ hydrochloric acid ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้อัตราส่วน 1 mol ของ ENR ต่อ 1.5 mol ของ hydrochloric acid (ปริมาณหมู่ฟีนอกไซค์หาได้จากเทคนิค NMR) ซึ่งในกรณีที่ใช้อย่าง 12.5 g จะใช้ hydrochloric acid 3.7 ml ละลายใน THF 20 ml จากนั้นจึงค่อย ๆ หยดสารละลาย hydrochloric acid ใน THF 20 ml ลงไปในสารละลาย ENR ใน THF ที่เตรียมไว้ก่อนหน้าโดยใช้ graduated funnel ให้หมดภายในเวลา 20-30 นาที

3.3.3 ปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 3 ชั่วโมง ก็จะได้สารละลายของ ENR-OH

3.3.4 นำสารละลายที่ได้มาตกตะกอนด้วยเมทานอล จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วกดให้เป็นแผ่นบาง ๆ แล้วนำเข้าตู้อบสูญอากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลาประมาณ 72 ชั่วโมง เพื่อทำให้ยางแห้ง ก็จะได้ยาง ENR-OH จากนั้นเก็บใส่ภาชนะปิด

#### การคำนวณปริมาณของ hydrochloric acid ที่ใช้ในการเตรียม ENR-OH

- งานวิจัยนี้จะใช้ 37% v/v hydrochloric acid ในอัตราส่วนโดยโมลของ hydrochloric acid ต่อ ENR เท่ากับ 1.5 ต่อ 1

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค  $^1\text{H NMR}$  พบว่าสังเคราะห์ ENR ได้ 20%

น้ำหนักโมเลกุลของหน่วยซ้ำของยาง ENR เท่ากับ 84 g / mol

น้ำหนักโมเลกุลของ hydrochloric acid เท่ากับ 36.46 g / mol

ความหนาแน่นของ hydrochloric acid เท่ากับ 1.19 g / ml

ดังนั้น ต้องเตรียม hydrochloric acid ในปริมาณ เท่ากับ

$$12.5 \text{ g Rubber} \left( \frac{20 \text{ g ENR}}{100 \text{ g Rubber}} \right) \left( \frac{1 \text{ mol ENR}}{84 \text{ g ENR}} \right) \left( \frac{1.5 \text{ mol HCl}}{1 \text{ mol ENR}} \right) \left( \frac{36.46 \text{ g HCl}}{1 \text{ mol HCl}} \right) \\ \left( \frac{1 \text{ ml HCl}}{1.19 \text{ g HCl}} \right) \left( \frac{100 \text{ ml Soln HCl}}{37 \text{ ml HCl}} \right) = 3.697 \text{ ml Soln HCl}$$

ตอนที่ 2 การเตรียมและการขึ้นรูปชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง (thermoplastic starch, TPS)

1. การผสม compound และการเตรียม thermoplastic starch (TPS) ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็นยาง natural rubber (NR) และ hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH)

ผสม compound ตามสูตรดังตารางที่ 3.1 โดยนำแป้งที่อบแล้วมาผสมกับ glycerol และยางแต่ละชนิดในถุง polyethylene ถุงละ 50 g ดังรูปที่ 3.2 โดยที่การผสมทุก ๆ ระบบจะใช้ glycerol ในสัดส่วน 25% ของน้ำหนักระบบที่หักน้ำหนักของยางออกไปแล้ว [22] จากนั้นเขย่าให้ glycerol กระจายตัวประมาณ 20 นาที แล้วนำไปเก็บไว้ในภาชนะปิดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต่อมา นำ compound ไปผสมในเครื่อง internal mixer ครั้งละ 1 ถุง โดยใช้อุณหภูมิในการผสมที่ 160 °C สำหรับ compound ที่ไม่มีและมี NR อุณหภูมิในการผสมที่ 100 °C สำหรับ compound ที่มี ENR-OH (เนื่องจากถ้าใช้อุณหภูมิในการผสมมากกว่า 100 °C จะทำให้ TPS ที่ได้มีลักษณะคล้ายของเหลวและเริ่มเกิดการไหม้) ที่ความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 50 rpm เป็นเวลา 6 นาที จากนั้น นำ compound ที่ผ่านการผสมไปเก็บไว้ในภาชนะปิดที่ภายในบรรจุสารดูดความชื้น (silica gel) เพื่อรอการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต่อไป



รูปที่ 3.2 compound ในถุง polyethylene

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมแป้ง glycerol และยางแต่ละชนิด

สูตร	ชนิดของยาง	สัดส่วนของยางที่เติม (% w/w)	น้ำหนักที่ใช้ (g)		
			แป้ง	glycerol	ยาง
TPS-0RB	No rubber	0	37.500	12.563	0.00
TPS-1NR	NR	1	37.125	12.437	0.50
TPS-3NR	NR	3	36.375	12.186	1.50
TPS-5NR	NR	5	35.625	11.935	2.50
TPS-7NR	NR	7	34.875	11.683	3.50
TPS-10NR	NR	10	33.750	11.306	5.00
TPS-1ENR-OH	ENR-OH	1	37.125	12.437	0.50
TPS-3ENR-OH	ENR-OH	3	36.375	12.186	1.50
TPS-5ENR-OH	ENR-OH	5	35.625	11.935	2.50
TPS-7ENR-OH	ENR-OH	7	34.875	11.683	3.50
TPS-10ENR-OH	ENR-OH	10	33.750	11.306	5.00

#### หมายเหตุ

การผสมจะต้องผสมจนกระทั่งเนื้อสัมผัสระหว่างแป้งกับ glycerol มีลักษณะร่วนจนเป็นเนื้อละเอียด จึงจะถือว่า glycerol ได้กระจายตัวในเนื้อแป้งอย่างเต็มที่

### 2. การผสม compound และการเตรียม thermoplastic starch (TPS) ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA)

#### 2.1 การผสมและการเตรียม master batch ระหว่างแป้งกับ PI-g-MA

2.1.1 ผสมแป้งกับ PI-g-MA ในสัดส่วนของแป้งเท่ากับ 75% w/w โดยนำแป้งที่อบมาแล้วมาผสมกับ PI-g-MA ในกล่องพลาสติก polyethylene ครั้งละ 50 g ในการผสมควรจะให้เข้ากันอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการดูดความชื้นของแป้ง จากนั้นนำไปเก็บไว้ในภาชนะปิดที่ภายในบรรจุสารดูดความชื้น (silica gel) เป็นเวลา 1 คืน

2.1.2 นำของผสมไปผสมในเครื่อง internal mixer ครั้งละ 50 g โดยใช้อุณหภูมิในการผสมที่ 225 °C ที่ความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 50 rpm เป็นเวลา 6 นาที จากนั้นนำ master batch มาเก็บไว้ในภาชนะปิดที่ภายในบรรจุสารดูดความชื้น (silica gel) เพื่อรอการนำไปผสมเข้าสู่สูตรกับแป้งและ glycerol เพื่อเตรียมเป็น TPS ต่อไป

## 2.2 การเตรียม TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น PI-g-MA

2.2.1 ผสม compound ตามสูตรดังตารางที่ 3.2 โดยนำแป้งที่อบมาแล้วมาผสมกับ glycerol และ master batch ในถุง polyethylene ถุงละ 50 g โดยที่การผสมทุก ๆ ระบบจะใช้ glycerol ในสัดส่วน 25% ของน้ำหนักระบบที่หักน้ำหนักของยางออกไปแล้ว จากนั้นเขย่าให้ glycerol กระจายตัวประมาณ 20 นาที แล้วนำไปเก็บไว้ในภาชนะปิดเป็นเวลา 1 คืน

2.2.2 นำ compound ไปผสมในเครื่อง internal mixer ครั้งละ 1 ถุง โดยใช้อุณหภูมิในการผสมที่ 160 °C ที่ความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 50 rpm เป็นเวลา 6 นาที จากนั้นนำ compound ที่ผ่านการผสมไปเก็บไว้ในภาชนะปิดที่ภายในบรรจุสารดูดความชื้นเพื่อรอการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต่อไป

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมแป้ง glycerol และ master batch

สูตร	ชนิดของยาง	สัดส่วนของยางที่เติม (% w/w)	น้ำหนักที่ใช้ (g)		
			แป้ง	glycerol	master batch
TPS-1Pi-g-MA	PI-g-MA	1	35.625	12.437	2
TPS-3Pi-g-MA	PI-g-MA	3	31.875	12.186	6
TPS-5Pi-g-MA	PI-g-MA	5	28.125	11.935	10
TPS-7Pi-g-MA	PI-g-MA	7	24.375	11.683	14
TPS-10Pi-g-MA	PI-g-MA	10	18.750	11.306	20

### หมายเหตุ

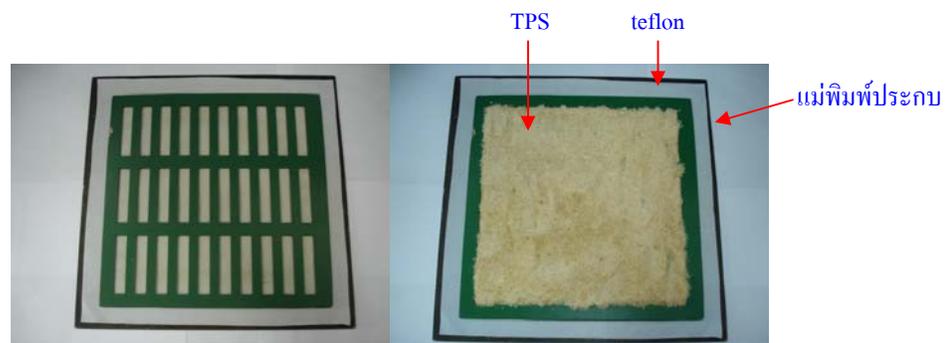
ใน master batch ประกอบด้วยแป้ง 75% w/w และ PI-g-MA 25% w/w

## 3. การขึ้นรูปชิ้นงาน thermoplastic starch (TPS) เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล

นำ TPS ที่ผ่านการผสมด้วยเครื่อง internal mixer มาบดให้เป็นเม็ดเล็ก ๆ ด้วยเครื่องบด และเตรียมแม่พิมพ์ดังรูปที่ 3.3 ต่อมานำ TPS ที่ผ่านการบดแล้วมาใส่ลงบนแม่พิมพ์จนเต็ม ซึ่งใช้สารประมาณ 130-150 g สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก และใช้สารประมาณ 100-130 g สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง จากนั้นปิดประกบแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.4 ลักษณะก่อนการปิดประกบแม่พิมพ์



รูปที่ 3.5 ลักษณะหลังปิดประกบแม่พิมพ์

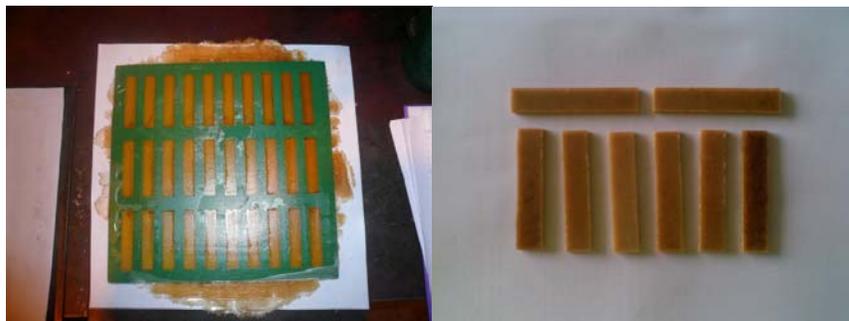
จากนั้นนำเข้าเครื่อง compression molding ในการอัดเข้าแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 3.6 โดยในการอัดเข้าแม่พิมพ์มี 3 ขั้นตอนดังนี้

- |           |                       |                  |
|-----------|-----------------------|------------------|
| ขั้นที่ 1 | : แรงอัด 1000 pounds  | เป็นเวลา 15 นาที |
| ขั้นที่ 2 | : แรงอัด 15000 pounds | เป็นเวลา 3 นาที  |
| ขั้นที่ 3 | : แรงอัด 23000 pounds | เป็นเวลา 2 นาที  |

แต่ละขั้นตอนจะใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปเท่ากันหมด ซึ่งสำหรับ TPS ในระบบที่ไม่มี การเติมยาง, เต็ม NR และเต็ม PI-g-MA จะใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 160 °C ส่วน TPS ในระบบ ที่มีการเติม ENR-OH จะใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 100 °C จากนั้นรอให้อุณหภูมิแม่พิมพ์ประกบ แผ่นบนและแม่พิมพ์ประกบแผ่นล่างของเครื่อง compression molding ลดลงเหลือประมาณ 55-60 °C จึงนำแม่พิมพ์ออกจาก compression molding จากนั้นแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เพื่อนำ ชิ้นงานไปทดสอบต่อไป ลักษณะชิ้นงานที่ได้หลังจากผ่านการขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง compression molding



รูปที่ 3.7 ลักษณะที่ได้หลังจากผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี compression molding

### ตอนที่ 3 การพิสูจน์เอกลักษณ์และการทดสอบสมบัติต่าง ๆ

1. การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ natural rubber (NR), epoxidized natural rubber (ENR), hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH), polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA) และ master batch ของแป้งมันสำปะหลัง (tapioca flour) กับ polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA)

1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค *Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)*

1.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ NR, ENR และ ENR-OH แล้วเปรียบเทียบว่ามีหมู่ hydroxyl (-OH) เกิดขึ้นจริง โดยการนำยาง NR, ENR และ ENR-OH ที่ผ่านการสังเคราะห์และเก็บไว้ในภาชนะปิดมาทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้น โดยใช้โหมด ATR ในการทดสอบ ที่ช่วง wave number เท่ากับ  $4,000 - 600 \text{ cm}^{-1}$  และ resolution ของการ scans (16 scans) เท่ากับ  $4 \text{ cm}^{-1}$  จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแป้งมันสำปะหลัง, PI-g-MA และ master batch แล้วเปรียบเทียบว่ามีหมู่ ester เกิดขึ้นจริง โดยการนำแป้งมันสำปะหลัง, PI-g-MA และ master batch มาทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้น โดยใช้โหมด ATR ในการทดสอบ ที่ช่วง wave number เท่ากับ  $4,000 - 900 \text{ cm}^{-1}$  และ resolution ของการ scans (16 scans) เท่ากับ  $4 \text{ cm}^{-1}$  จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค *Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR)*

นำยาง NR, ENR และ ENR-OH ปริมาณอย่างละ 6-10 mg ละลายใน d-chloroform (deuteriochloroform,  $\text{CDCl}_3$ ) ประมาณ 1-2 ml แล้วกวนด้วย magnetic bar ให้เนื้ออย่างละลายเป็นเวลา 4 วัน เพื่อให้เนื้ออย่างละลายหมด จากนั้นทำตัวอย่างไปทดสอบด้วยโหมด  $^1\text{H}$  NMR ที่ความถี่ 300 MHz เพื่อหา % epoxidation และ % ring opening ที่เกิดขึ้น จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลอง

2. การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน thermoplastic starch (TPS)

2.1 *Impact testing (charpy impact)* ทำตามมาตรฐาน ASTM D 256

2.1.1 บากชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องบากจำนวน 20 ชิ้น ในแต่ละสูตรผสม

2.1.2 วัดความกว้าง ความหนา ของพื้นที่ด้านหลังรอยบากของชิ้นงาน

2.1.3 นำชิ้นงานไปทดสอบโดยยึดชิ้นงานให้แน่นที่ฐานของเครื่องทดสอบและ  
หันด้านที่มีรอยบากออกจาก pendulum (ขนาด 4 Jules) แล้วปล่อย pendulum ให้ตกลงมากระทบ  
ชิ้นงาน

2.1.4 บันทึกค่าพลังงานที่ได้ (หน่วย mJ) และทำการทดสอบเช่นเดียวกันทุก  
ชิ้นงาน

2.1.5 คำนวณหาพลังงานต่อพื้นที่ของรอยแตก (หน่วย mJ/mm<sup>2</sup>)

2.1.6 หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

2.1.7 ทำแผนภูมิควบคุม (control chart) เพื่อเลือกข้อมูลที่อยู่ในช่วงการยอมรับ  
ได้จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลที่ได้

## 2.2 Tensile testing ทำตามมาตรฐาน ASTM D 638

2.2.1 วัดความกว้าง ความหนา ของชิ้นงาน dumbbell จำนวน 20 ชิ้น ใน TPS  
แต่ละสูตรด้วยเวอร์เนีย คาร์ลิปเปอร์ โดยทำการวัด 3 ช่วง คือ ช่วงต้น ช่วงกลาง และช่วงปลาย  
จากนั้นนำค่ากลางที่ได้มาใช้ในการคำนวณ

2.2.2 นำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึง โดยใช้ความเร็วในการดึงยึด 1 mm/min  
และใช้ load cell ขนาด 1 kN

2.2.3 บันทึกผลข้อมูล ค่า Young's modulus, tensile strength และ percentage  
strain at break จากนั้นทำการทดสอบเช่นเดียวกันทุกชิ้นงาน

2.2.4 นำข้อมูลมาเขียนกราฟหาความสัมพันธ์เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ  
TPS แต่ละสูตร

2.2.5 หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

2.2.6 ทำแผนภูมิควบคุม (control chart) เพื่อเลือกข้อมูลที่อยู่ในช่วงการยอมรับ  
ได้จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลที่ได้

## 3. การศึกษาปริมาณการดูดความชื้นของชิ้นงาน thermoplastic starch (TPS)

เตรียมสารละลายของ magnesium nitrate ( $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) โดยนำ magnesium  
nitrate ( $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) ผสมกับน้ำกลั่นในบีกเกอร์ที่มีความร้อนเล็กน้อย จากนั้นทำให้  
อิมตัวยิ่งยวด ต่อมาเทสารละลายดังกล่าวลงใน chamber ที่มีฝาปิด จะได้ chamber ที่มีความชื้น  
สัมพัทธ์ 53% ต่อมานำชิ้นงานที่เตรียมไว้ข้างต้น ซึ่งในที่นี่จะใช้ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อ

แรงดึงระบบละ 7 ชั่งงาน วางบนตะแกรงลวดแล้วนำไปใส่ไว้ใน chamber ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 53% ดังรูปที่ 3.8 จากนั้นเก็บชั่งงานไว้เป็นเวลา 7 วัน ในระหว่างเก็บชั่งงานเป็นเวลา 7 วัน ให้นำชั่งงานที่อยู่ใน chamber ออกมาชั่งทุก ๆ วัน ตลอด 7 วัน เพื่อศึกษาผลของการดูดความชื้นของชั่งงาน โดยวัดน้ำหนักของชั่งงานที่เปลี่ยนแปลงไป สุดท้ายนำค่าน้ำหนักของชั่งงานที่เปลี่ยนแปลงไปมาคำนวณหา %moisture adsorption



รูปที่ 3.8 chamber เก็บชั่งงานทดสอบที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 53%

#### 4. การวิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยา

4.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวรอยแตกหักของ TPS เมื่ออนุภาคของยางยังอยู่ในระบบ

4.1.1 นำชั่งงาน TPS ที่ใช้ทดสอบแรงกระแทกในระบบ TPS-ORB, TPS-3NR, TPS-7NR, TPS-3ENR-OH, TPS-7ENR-OH, TPS-3Pi-g-MA และ TPS-7Pi-g-MA จุ่มลงในไนโตรเจนเหลว จากนั้นหักชั่งงานแล้วเก็บชั่งงานที่แตกหักไว้ในภาชนะปิดที่ภายในบรรจุสารดูดความชื้น (silica gel) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.1.2 นำชั่งงานขนาดที่พอเหมาะแก่การติดลงบนแผ่น slit สำหรับทดสอบด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) ติดลงบนแผ่น slit จากนั้นเคลือบด้วยทองเป็นเวลา 30 นาที ก่อนการทดสอบ

4.1.3 ทดสอบด้วยเทคนิค SEM เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวรอยแตกหัก โดยใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 20 kV กำลังขยายที่ 500 และ 1,000 เท่า จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวรอยแตกหักของ TPS เมื่ออนุภาคของยางถูกสกัดออกจากระบบ

4.2.1 นำชิ้นงานในระบบ TPS-3NR, TPS-7NR, TPS-3ENR-OH, TPS-7ENR-OH, TPS-3Pi-g-MA และ TPS-7Pi-g-MA มาทำ soxhlet extraction เพื่อกำจัดอนุภาคของยางบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักออก โดยใช้ toluene เป็นตัวทำละลายที่ชะล้างยางออก ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

4.2.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการทำ soxhlet extraction ไปเก็บไว้ในภาชนะปิดที่ภายในบรรจุสารดูดความชื้น (silica gel) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.2.3 ทำเช่นเดียวกับข้อ 4.1.2 และ 4.1.3 ตามลำดับ

## บทที่ 4

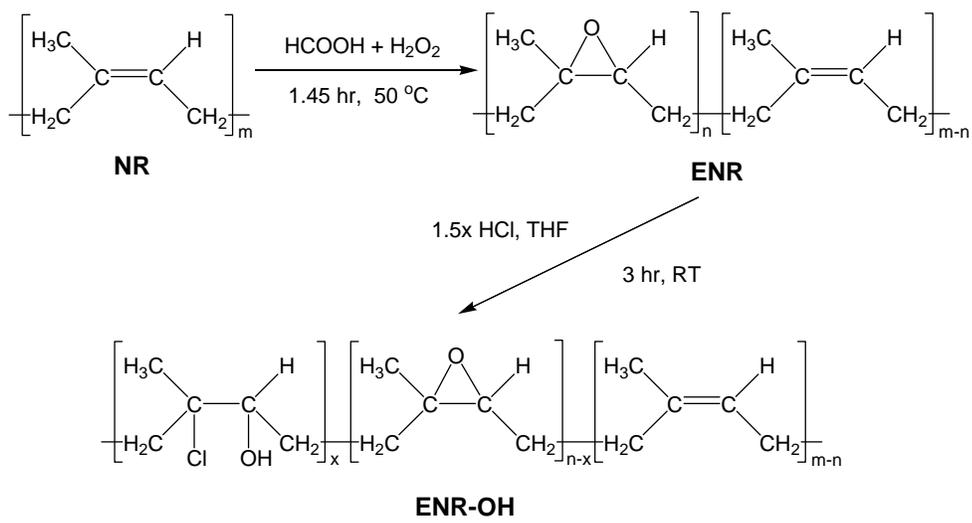
### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 การสังเคราะห์ hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH) และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ natural rubber (NR), epoxidized natural rubber (ENR), hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH), แป้งมันสำปะหลัง (tapioca flour), polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA) และ master batch ของแป้งมันสำปะหลัง (tapioca flour) กับ polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA)

#### 1. การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

##### 1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ natural rubber (NR), epoxidized natural rubber (ENR), hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH)

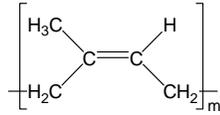
ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ ENR-OH จากน้ำยางธรรมชาติ สามารถเกิดขึ้นได้ดีจากขั้นตอนทางเคมีหลัก ๆ 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรก การสังเคราะห์ ENR จากน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้ formic acid และ hydrogen peroxide ทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติ จากนั้นในขั้นตอนที่สอง จะเป็นการเปิดวงแหวนอีพอกไซด์ของ ENR ด้วย HCl ปฏิกิริยาทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.1 ในส่วนของผลการสังเคราะห์ ENR สามารถแสดงผล FT-IR spectrum ของ NR และ ENR ได้ดังรูปที่ 4.3 และ 4.5 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะเห็นความแตกต่างโดย spectrum ของ ENR จะพบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง  $870\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบยืดของวงแหวนอีพอกไซด์) และ  $1249\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบยืดของ C-O ในอีเธอร์) นอกจากนี้ spectrum ของ NR ในตำแหน่ง  $1643\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบยืดของ C=C) และ  $833\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบงอของ C=C-H) ยังมี % transmittance ลดลง จากเหตุผลเหล่านี้ทำให้สรุปได้ว่ามีหมู่อีพอกไซด์เกิดขึ้นภายในโมเลกุลของ NR ส่วนของ ENR-OH แสดง FT-IR spectrum ได้ดังรูปที่ 4.7 โดยจะพบการดูดกลืนเป็นช่วงกว้างที่  $3150 - 3600\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบยืดของ -OH),  $1017\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบยืดของ C-O ในแอลกอฮอล์) และ  $670\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบยืดของ C-Cl) ตำแหน่งเหล่านี้จะไม่พบใน spectrum ของ ENR แสดงว่าสามารถเปิดวงของอีพอกไซด์ได้ด้วย HCl



รูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาทั้ง 2 ขั้นตอนที่ใช้ในการสังเคราะห์ ENR-OH

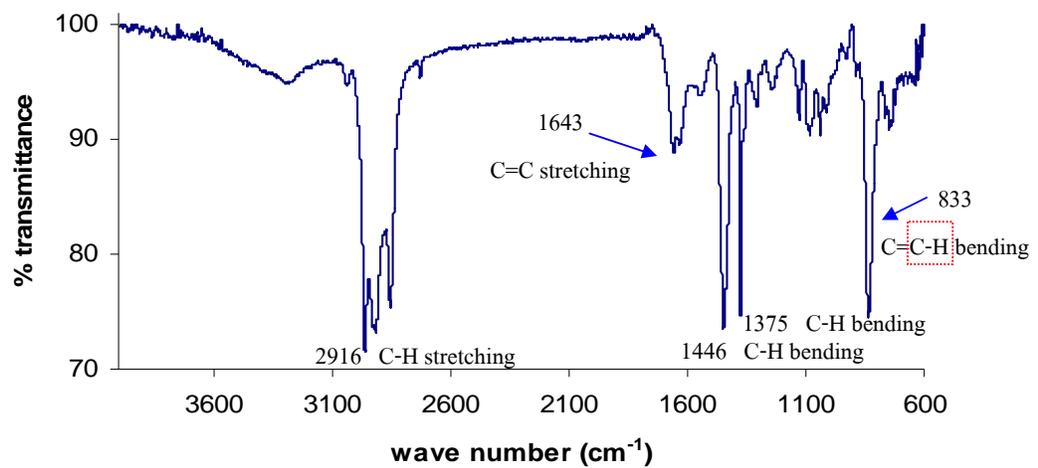
### 1.1.1 natural rubber (NR)

#### 1. ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ NR



รูปที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ NR

#### 2. ลักษณะ spectrum ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR



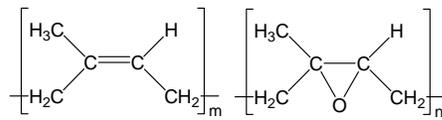
รูปที่ 4.3 FT-IR spectrum ของ NR

#### 3. เลขคลื่นที่แสดงหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของ NR

2916 cm <sup>-1</sup>	C - H stretching
1643 cm <sup>-1</sup>	C = C stretching
1446 cm <sup>-1</sup>	C - H bending
1375 cm <sup>-1</sup>	C - H bending
833 cm <sup>-1</sup>	C = C - H bending

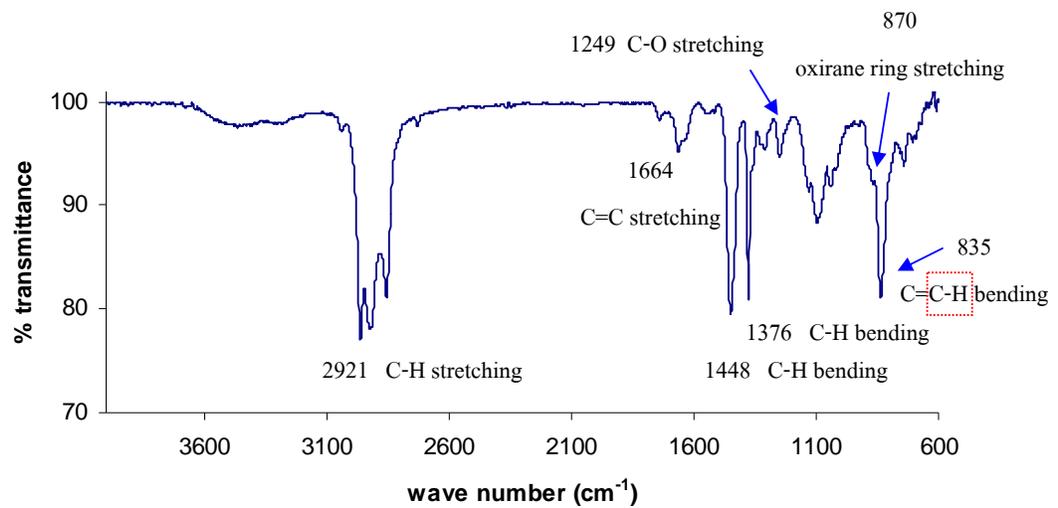
### 1.1.2 epoxidized natural rubber (ENR)

#### 1. ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ ENR



รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ ENR

#### 2. ลักษณะ spectrum ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR



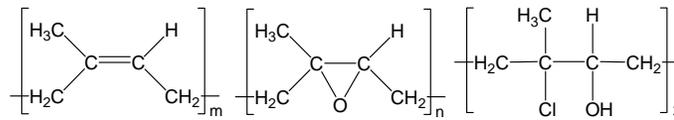
รูปที่ 4.5 FT-IR spectrum ของ ENR

#### 3. เลขคลื่นที่แสดงหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของ ENR

2921 cm <sup>-1</sup>	C - H stretching	} หมู่ฟังก์ชันของ NR
1644 cm <sup>-1</sup>	C = C stretching	
1448 cm <sup>-1</sup>	C - H bending	
1376 cm <sup>-1</sup>	C - H bending	
835 cm <sup>-1</sup>	C = C - H bending	
1249 cm <sup>-1</sup>	C - O stretching	} หมู่ฟังก์ชันของ ENR
870 cm <sup>-1</sup>	oxirane ring stretching	

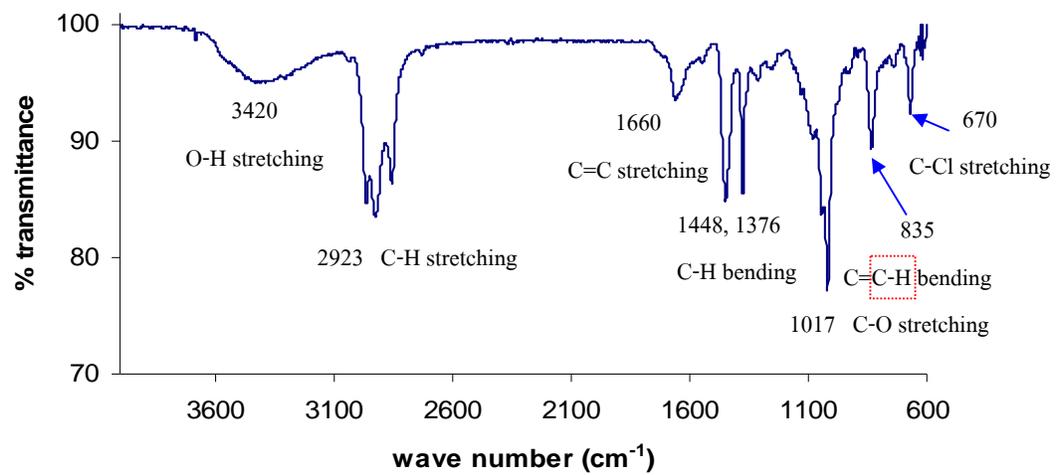
### 1.1.3 hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH)

#### 1. ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ ENR-OH



รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ ENR-OH

#### 2. ลักษณะ spectrum ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR

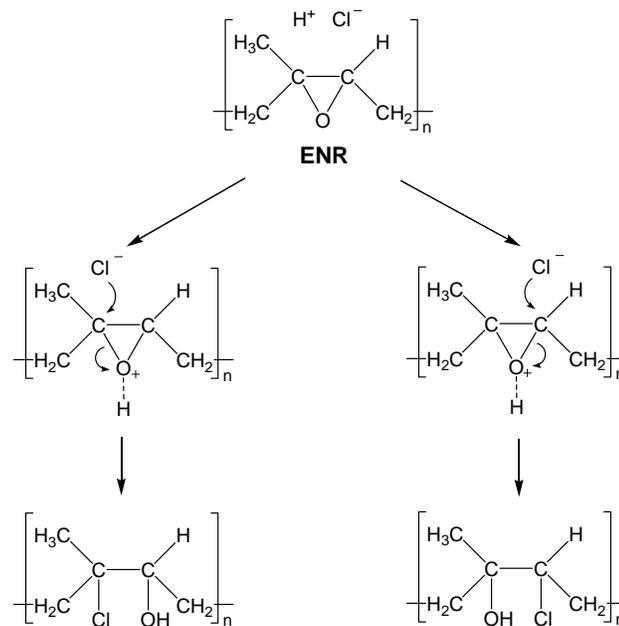


รูปที่ 4.7 FT-IR spectrum ของ ENR-OH

#### 3. เลขคลื่นที่แสดงหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของ ENR-OH

2923 $\text{cm}^{-1}$	C - H stretching	} หมู่ฟังก์ชันของ NR
1660 $\text{cm}^{-1}$	C = C stretching	
1448 $\text{cm}^{-1}$	C - H bending	
1376 $\text{cm}^{-1}$	C - H bending	
835 $\text{cm}^{-1}$	C = C - H bending	
3420 $\text{cm}^{-1}$	O - H stretching	} หมู่ฟังก์ชันของ ENR-OH
1017 $\text{cm}^{-1}$	C - O stretching	
670 $\text{cm}^{-1}$	C - Cl stretching	

ในส่วนของกลไกการเกิดปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอีพ็อกไซด์ด้วย HCl จะเกิดผ่านกลไก 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกโปรตอน ( $H^+$ ) จะเข้าไป protonate ที่อะตอมของออกซิเจน (O) ในวงแหวนอีพ็อกไซด์ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีประจุบสูงสุด หลังจากนั้น  $Cl^-$  จึงเข้าไปเปิดวงแหวน โดยมี 2 ตำแหน่งที่  $Cl^-$  สามารถเข้าไปได้ คือ ตำแหน่งคาร์บอนที่มีหมู่เมทิลมาเกาะอยู่ ( $-CCH_3-$ ) ดังปฏิกิริยาที่แสดงในด้านซ้ายของรูปที่ 4.8 และตำแหน่งคาร์บอนที่มีไฮโดรเจนมาเกาะอยู่ ( $-CH-$ ) ดังปฏิกิริยาที่แสดงในด้านขวาของรูปที่ 4.8



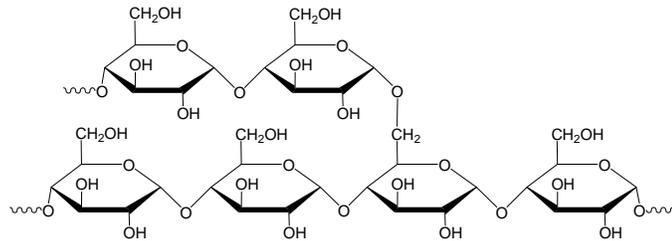
**รูปที่ 4.8** กลไกของปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอีพ็อกไซด์ใน ENR ด้วย HCl

## 1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแป้งมันสำปะหลัง (tapioca flour), polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA) และ master batch ของแป้งมันสำปะหลัง (tapioca flour) กับ polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA)

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแป้งมันสำปะหลัง, PI-g-MA และ master batch ของแป้งมันสำปะหลังกับ PI-g-MA ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10, 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ จากการทดสอบการหาอุณหภูมิสำหรับการผสม master batch ระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับ PI-g-MA ในเครื่อง internal mixer เพื่อที่จะทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของแป้งกับส่วนของ maleic anhydride ของ PI-g-MA ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า spectrum ของ master batch ที่อุณหภูมิตั้งแต่ก่อนผสมจนกระทั่งถึง 220 °C ไม่ปรากฏพีกของการดูดกลืนคลื่นที่ตำแหน่ง 1738  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นส่วนของการสั่นแบบยืดของ C=O ใน ester จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิในการผสมสูงถึง 225 °C spectrum ของ master batch จะพบการดูดกลืนคลื่นที่ตำแหน่ง 1738  $\text{cm}^{-1}$  อย่างชัดเจน ในขณะที่ spectrum ของแป้งมันสำปะหลังกับ PI-g-MA ไม่ปรากฏการดูดกลืนคลื่นที่ตำแหน่งดังกล่าว นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้พีกที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการเชื่อมขวาง (ระหว่างหมู่ -OH ของแป้งกับส่วนของ maleic anhydride ของ PI-g-MA) ต่อพื้นที่ใต้พีกของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (-CH<sub>2</sub>, -CH<sub>3</sub>) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ที่อุณหภูมิ 225 °C มีส่วนที่เป็น ester เกิดขึ้น ส่วนการผสม master batch ที่อุณหภูมิมากกว่า 225 °C นั้นไม่สามารถกระทำได้นี้เนื่องจาก master batch มีการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลเข้มซึ่งอาจเกิดการไหม้เกิดขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการผสม master batch ในเครื่อง internal mixer ที่อุณหภูมิ 225 °C ก่อนที่จะนำไปเตรียมเป็น thermoplastic starch (TPS) ในระบบที่มี PI-g-MA เป็นสารเติมแต่ง โดยผลการทดสอบสมบัติการสลายตัวทางความร้อนจากเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ยืนยันได้ว่าแป้งมันสำปะหลังและ PI-g-MA ไม่สลายตัวที่อุณหภูมิ 225 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซออกซิเจน ดังแสดงในภาคผนวก ข ส่วนความเป็นไปได้ของปฏิกิริยา esterification ระหว่างโมเลกุลของแป้งกับ PI-g-MA แสดงดังรูปที่ 4.14

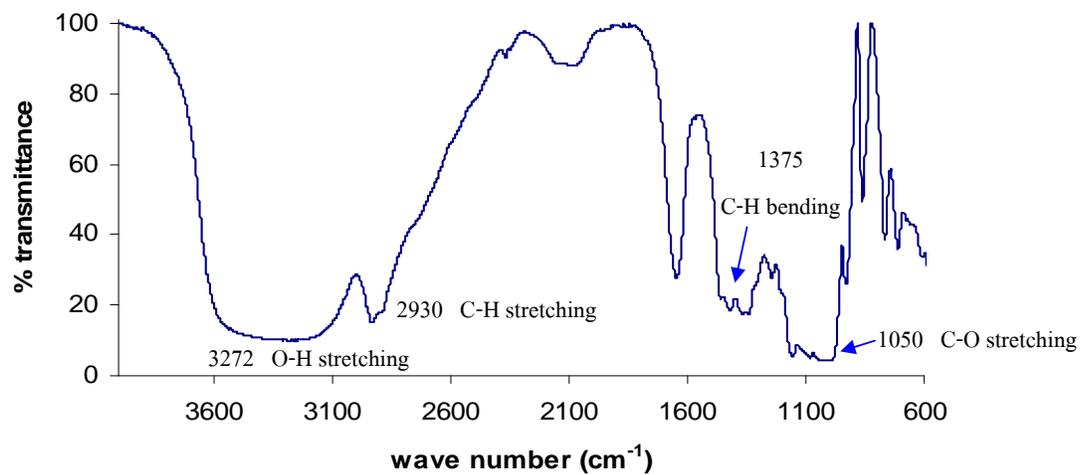
### 1.2.1 แป้งมันสำปะหลัง (tapioca flour)

#### 1. ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

#### 2. ลักษณะ spectrum ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR



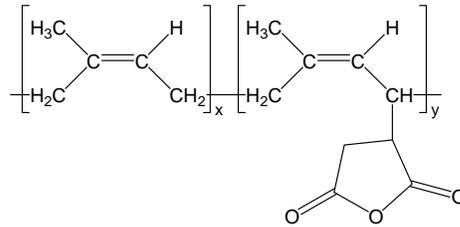
รูปที่ 4.10 FT-IR spectrum ของแป้งมันสำปะหลัง

#### 3. เลขคลื่นที่แสดงหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของแป้งมันสำปะหลัง

3272 $\text{cm}^{-1}$	O - H stretching
2930 $\text{cm}^{-1}$	C - H stretching
1375 $\text{cm}^{-1}$	C - H bending
1050 $\text{cm}^{-1}$	C - O stretching

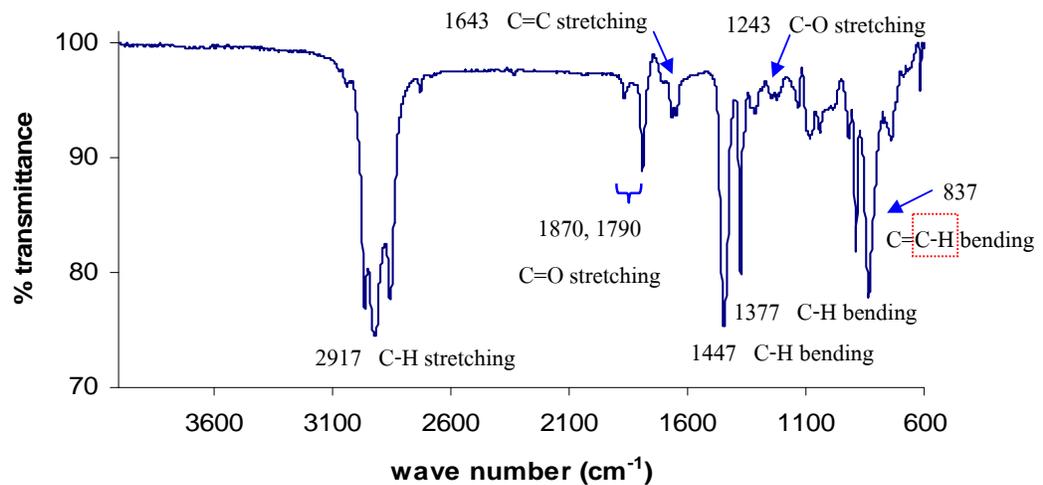
### 1.2.2 polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA)

#### 1. ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ PI-g-MA



รูปที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ PI-g-MA

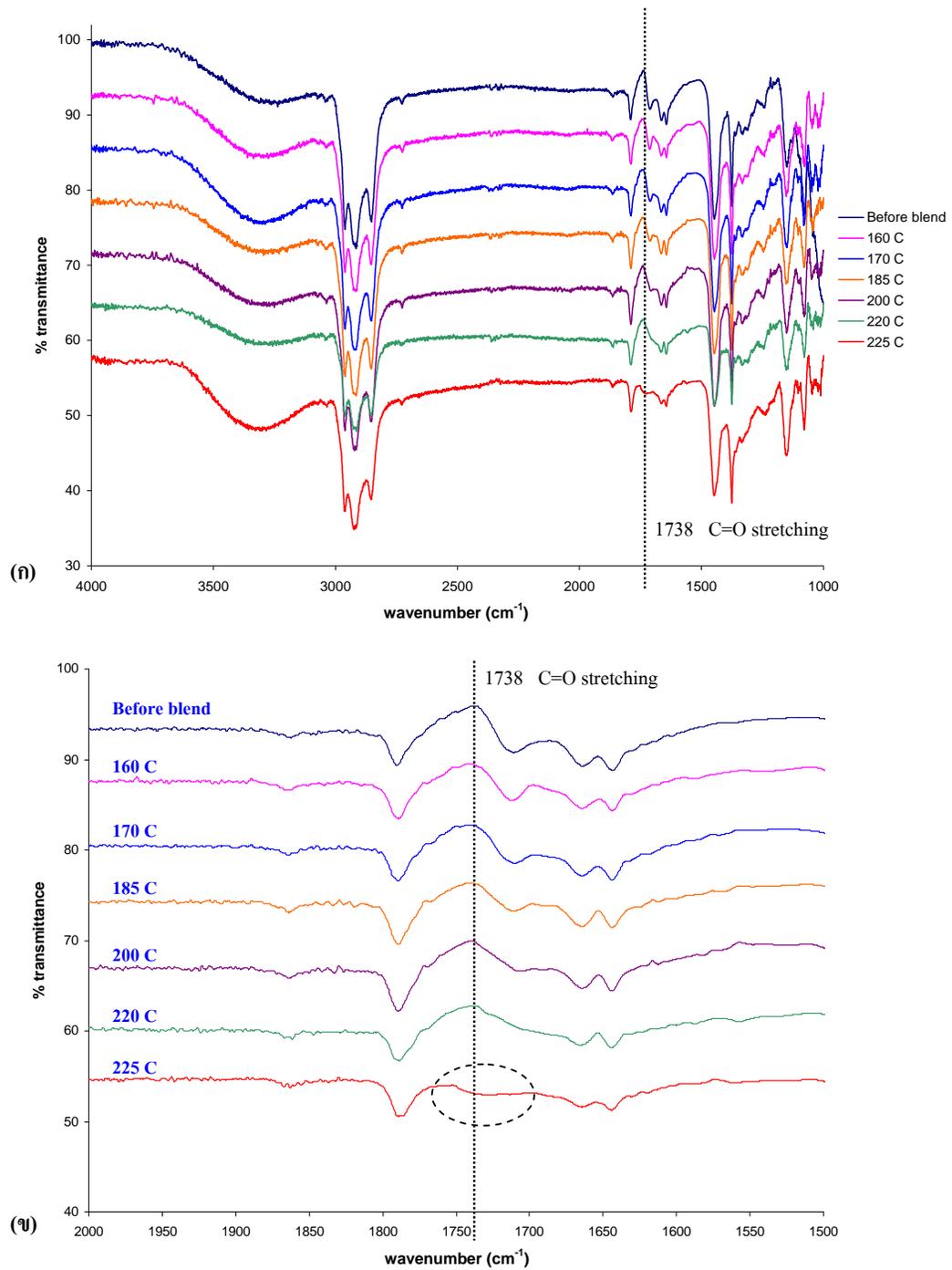
#### 2. ลักษณะ spectrum ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR



รูปที่ 4.12 FT-IR spectrum ของ PI-g-MA

#### 3. เลขคลื่นที่แสดงหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของ PI-g-MA

2917 cm <sup>-1</sup>	C - H stretching
1870 cm <sup>-1</sup>	C = O stretching
1790 cm <sup>-1</sup>	C = O stretching
1643 cm <sup>-1</sup>	C = C stretching
1447 cm <sup>-1</sup>	C - H bending
1377 cm <sup>-1</sup>	C - H bending
1243 cm <sup>-1</sup>	C - O stretching
837 cm <sup>-1</sup>	C = C - H bending



รูปที่ 4.13 FT-IR spectrum ของ master batch ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

(ก) ช่วง wave number ที่ 4000 – 1000  $\text{cm}^{-1}$

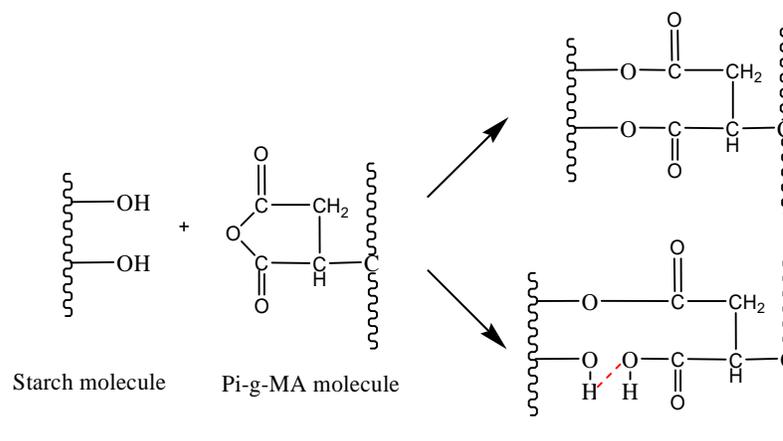
(ข) ช่วง wave number ที่ 2000 – 1500  $\text{cm}^{-1}$

**ตารางที่ 4.1** อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้พีคที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการเชื่อมขวาง (ระหว่างหมู่ -OH ของแป้งกับส่วนของ maleic anhydride ของ PI-g-MA) ต่อพื้นที่ใต้พีคของ ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (-CH<sub>2</sub>, -CH<sub>3</sub>) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ ในการผสม (°C)	peak	peak	peak	peak
	maleic anhydride 1 (a)	maleic anhydride 2 (b)	carbonyl (c)	ester (d)
	1871-1841 cm <sup>-1</sup>	1804-1761 cm <sup>-1</sup>	1719-1694 cm <sup>-1</sup>	1749-1719 cm <sup>-1</sup>
	ratio of area a/x	ratio of area b/x	ratio of area c/x	ratio of area d/x
before blend	0.051	0.075	0.975	0.000
160	0.042	0.070	0.955	0.000
170	0.050	0.067	0.793	0.000
185	0.038	0.064	0.812	0.000
200	0.042	0.068	0.711	0.000
220	0.062	0.097	0.668	0.000
225	0.032	0.061	1.078	0.041

#### หมายเหตุ

พื้นที่ใต้พีค ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการเชื่อมขวางรวมถึงพื้นที่ใต้พีคในตำแหน่งของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (-CH<sub>2</sub>, -CH<sub>3</sub>) หรือ area x แสดงอยู่ในภาคผนวก จ

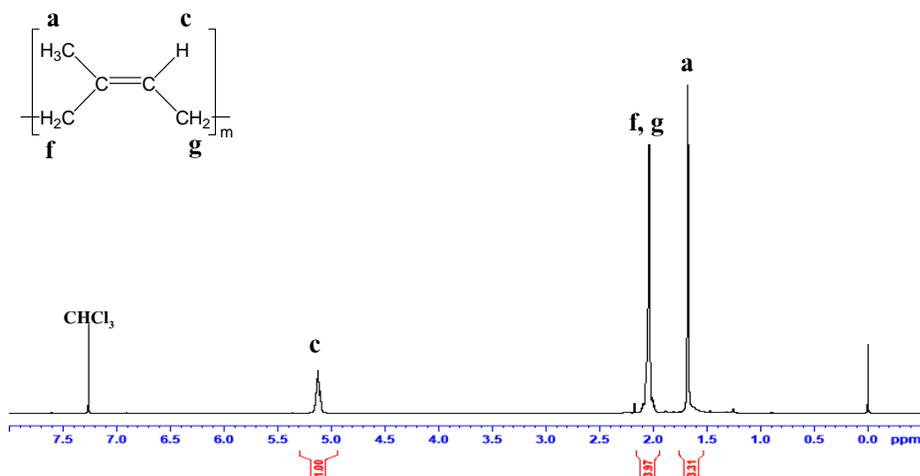


**รูปที่ 4.14** ปฏิกิริยา esterification ระหว่างโมเลกุลของแป้ง กับ PI-g-MA

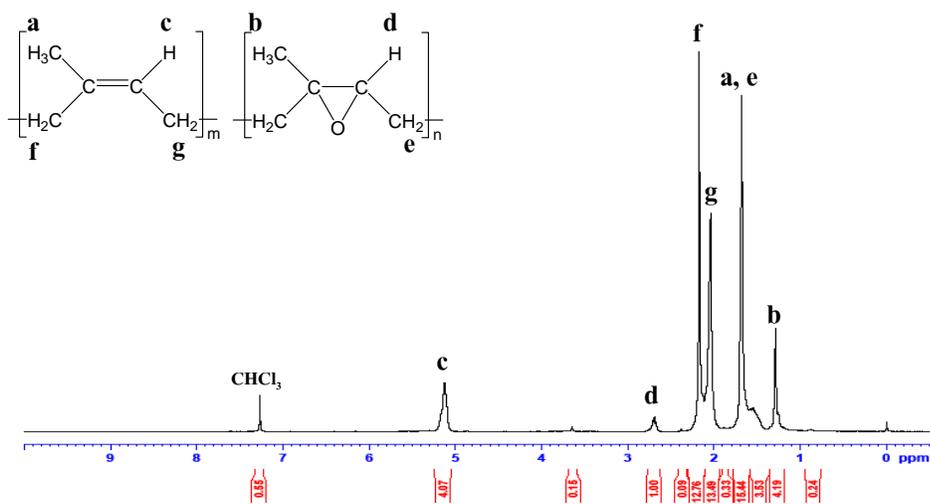
## 2. การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR)

การทำ % epoxidation และ % ring opening ของยาง ENR และ ENR-OH ด้วยเทคนิค Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR)

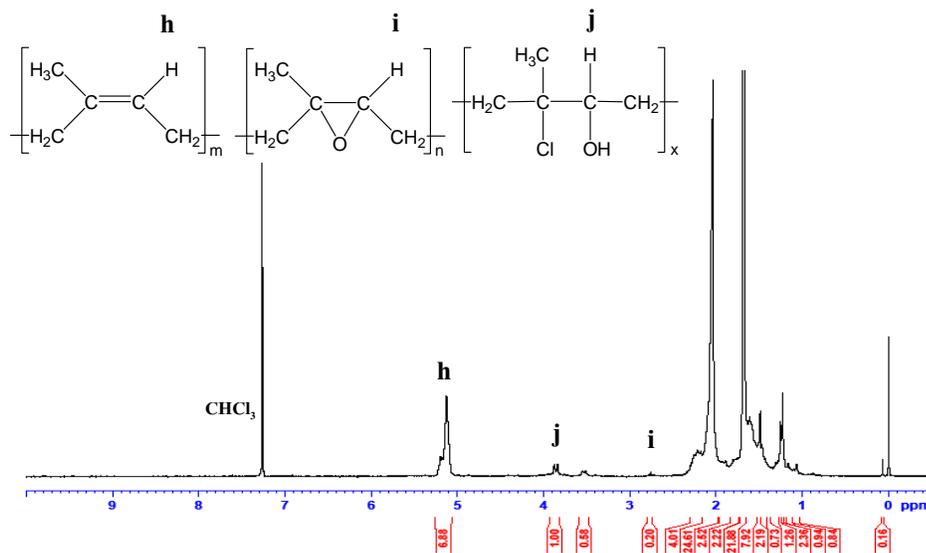
จากการทดสอบการทำ % epoxidation และ % ring opening ของยาง ENR และ ENR-OH ด้วยเทคนิค Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR) ได้ผลดังรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 แสดง  $^1\text{H}$  NMR spectrum ของ NR, ENR และ ENR-OH ตามลำดับ



รูปที่ 4.15  $^1\text{H}$  NMR spectrum ของ NR



รูปที่ 4.16  $^1\text{H}$  NMR spectrum ของ ENR



รูปที่ 4.17  $^1\text{H}$  NMR spectrum ของ ENR-OH

จาก  $^1\text{H}$  NMR spectrum ของ ENR ดังรูปที่ 4.16 จะเห็นว่า พันธะคู่ในโมเลกุลของยางธรรมชาติไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็น epoxide ring ได้ทั้งหมด ซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนจากสัญญาณ (chemical shift) ที่ 5.1 และ 2.7 ppm (จุด c และ d ตามลำดับ) โดยสัญญาณที่ 5.1 ppm แทนไฮโดรเจนอะตอมที่ต่อกับคาร์บอนที่สร้างพันธะคู่กับคาร์บอนอีกอะตอมหนึ่ง ส่วนสัญญาณที่ 2.7 ppm จะแทนไฮโดรเจนอะตอมที่ต่อคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของ oxirane ring ปริมาณของ oxirane ring (% epoxidation) สามารถหาได้จากการความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณที่ 5.1 และ 2.7 ppm ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{\% epoxidation} &= \frac{I_{2.7}}{I_{2.7} + I_{5.1}} \times 100 \\ &= \frac{1.00}{1.00 + 4.07} \times 100 = 19.72 \text{ \%} \end{aligned}$$

จาก  $^1\text{H}$  NMR spectrum ของ ENR-OH ดังรูปที่ 4.17 จะเห็นว่า ENR-OH ที่สังเคราะห์ได้นั้นยังมีพันธะคู่ (double bond ของ  $\text{C}=\text{C}$ ) และ oxirane ring () หลงเหลืออยู่ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสัญญาณที่จุด h, i และ j โดยตำแหน่งดังกล่าวจะแทนไฮโดรเจนอะตอมที่สร้างพันธะอยู่กับคาร์บอนภายใน repeating unit ของ NR, ENR และ ENR-OH ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ส่วนสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งอื่น ๆ จะคล้ายกับ  $^1\text{H}$  NMR spectrum ของ ENR ดังนั้นจาก FT-IR spectrum และ  $^1\text{H}$  NMR spectrum ของ ENR-OH ยืนยันได้ว่า สามารถสังเคราะห์ ENR-OH ได้จริง ในส่วนปริมาณของ oxirane ring (% epoxidation) และปริมาณของ

hydroxyl group (% ring-opening) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณที่ 5.1, 3.8 และ 2.7 ppm ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \% \text{ oxirane ring} &= \frac{I_{2.7}}{I_{2.7} + I_{3.8} + I_{5.1}} \times 100 \\ &= \frac{0.20}{0.20 + 1.00 + 6.88} \times 100 = 2.48 \% \\ \% \text{ hydroxyl group} &= \frac{I_{3.8}}{I_{2.7} + I_{3.8} + I_{5.1}} \times 100 \\ &= \frac{1.00}{0.20 + 1.00 + 6.88} \times 100 = 12.38 \% \end{aligned}$$

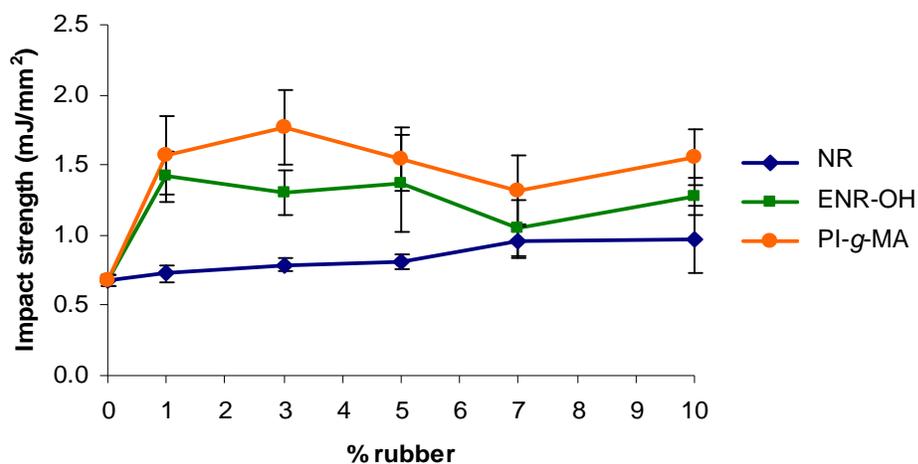
## ตอนที่ 2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน thermoplastic starch (TPS)

### 1. การวิเคราะห์สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact properties)

ชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก และปรับระดับของสารเติมแต่งซึ่งได้แก่ชนิดและปริมาณของยางให้แตกต่างกัน เมื่อนำมาทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกด้วยโหมคการทดสอบแบบ charpy โดยใช้ตุ้มน้ำหนักขนาด 4 Jules ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทกของ TPS สูตรต่าง ๆ

สูตร	ชนิดยาง	% ยาง	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )		ลักษณะการแตก
			Mean	SD	
TPS-0RB	No rubber	0	0.68	0.04	complete
TPS-1NR	NR	1	0.73	0.06	complete
TPS-3NR	NR	3	0.79	0.05	complete
TPS-5NR	NR	5	0.81	0.05	complete
TPS-7NR	NR	7	0.96	0.12	complete
TPS-10NR	NR	10	0.97	0.24	complete
TPS-1ENR-OH	ENR-OH	1	1.42	0.18	complete
TPS-3ENR-OH	ENR-OH	3	1.30	0.16	complete
TPS-5ENR-OH	ENR-OH	5	1.37	0.34	complete
TPS-7ENR-OH	ENR-OH	7	1.05	0.20	complete
TPS-10ENR-OH	ENR-OH	10	1.28	0.13	complete
TPS-1PI-g-MA	PI-g-MA	1	1.57	0.28	complete
TPS-3PI-g-MA	PI-g-MA	3	1.77	0.27	complete
TPS-5PI-g-MA	PI-g-MA	5	1.54	0.23	complete
TPS-7PI-g-MA	PI-g-MA	7	1.32	0.25	complete
TPS-10PI-g-MA	PI-g-MA	10	1.56	0.20	complete



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง impact strength กับปริมาณของยางที่ใช้ในแต่ละชนิดในการเตรียมชิ้นงาน TPS

จากการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงานตัวอย่าง TPS โดยใช้ การทดสอบแบบ charpy สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า การเติม NR ช่วยทำให้ค่า impact strength เพิ่มขึ้นมาเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับ TPS ในระบบที่ไม่ มีการเติมยาง เนื่องจาก interaction ที่ไม่ดีระหว่างแป้งซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วกับ NR ซึ่งเป็นโมเลกุล ไม่มีขั้ว เมื่อพิจารณาผลของการปรับปรุงสมบัติความต้านทานแรงกระแทกโดยใช้ ENR-OH และ Pi-g-MA เป็นสารเติมแต่งแทน NR จะพบว่า การปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกด้วย ยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรนั้นมีประสิทธิภาพโดยสังเกตได้จากค่า impact strength ของ TPS ใน ระบบที่ใช้ ENR-OH และ Pi-g-MA มีค่ามากกว่าค่า impact strength ของ TPS ในระบบที่ใช้ NR ใน ทุกอัตราส่วน เนื่องจากการเกิด interaction ระหว่างแป้งกับ ENR-OH และระหว่างแป้งกับ PI-g-MA ตามลำดับ

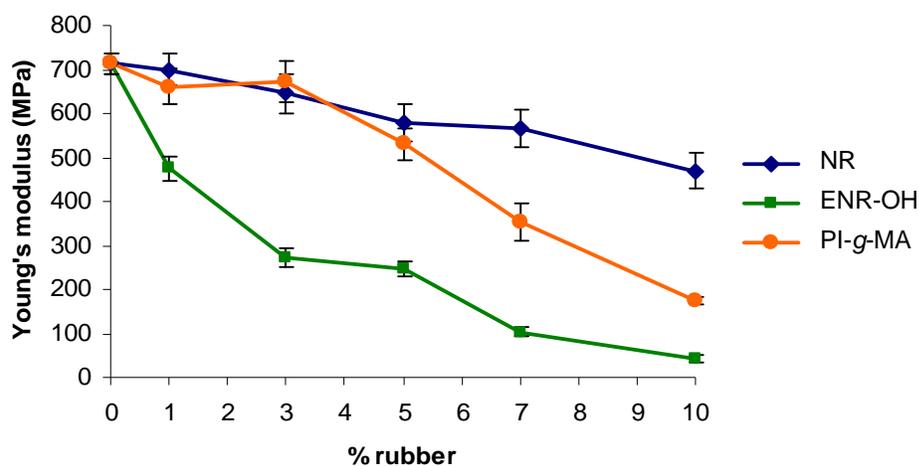
เมื่อเปรียบเทียบค่า impact strength ของ TPS ในระบบที่ใช้ ENR-OH และ PI-g-MA จะเห็นได้ว่า ค่า impact strength ของ TPS ในระบบที่ใช้ PI-g-MA มีค่ามากกว่า โดย TPS-3PI-g-MA สามารถปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกได้ดีที่สุด เนื่องจากแป้งสามารถทำ ปฏิกิริยาได้โดยตรงกับ PI-g-MA และเกิด covalent bonding ทำให้โมเลกุลของแป้งสามารถถ่าย โอนพลังงานที่ได้รับจากแรงกระแทกไปสู่ PI-g-MA ได้อย่างเต็มที่ ในขณะที่ TPS ในระบบที่ใช้ ENR-OH นั้น แป้งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับ ENR-OH ซึ่งเป็นอันตรกิริยาแบบ 2° bonding เท่านั้น การถ่ายโอนพลังงานจึงเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบค่า impact strength ของ TPS ในระบบยางชนิดเดียวกันแต่มีปริมาณยางที่แตกต่างกันในส่วนของ ENR-OH และ PI-g-MA จะพบว่า ปริมาณยางที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้ค่า impact strength เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน สันนิษฐานได้ว่า ปริมาณยางที่มากขึ้นอาจเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) จนไม่สามารถ ทำให้ชิ้นงานรับแรงกระแทกได้มากขึ้น เนื่องจากไม่สามารถกระจายแรงกระแทกเข้าสู่อนุภาคของ ยางได้อย่างเต็มที่

## 2. การวิเคราะห์สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยืด (tensile properties)

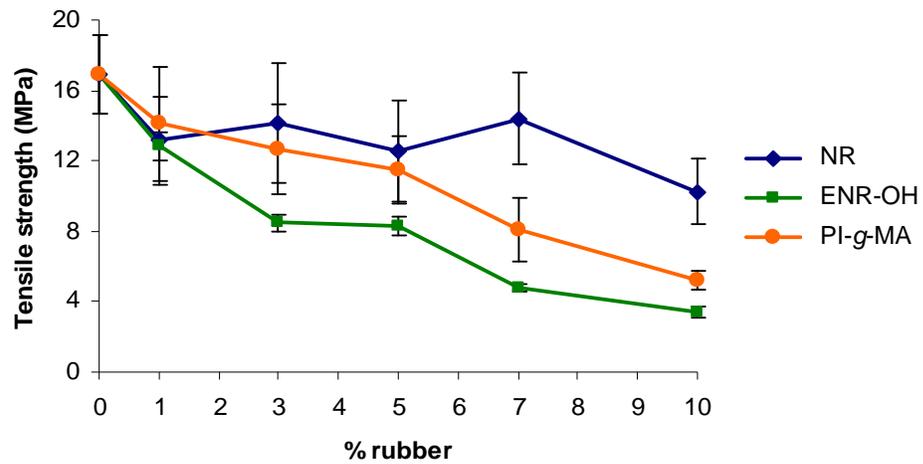
ชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS ที่ เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก และปรับระดับของสารเติมแต่งซึ่งได้แก่ชนิดและปริมาณของยางให้แตกต่างกัน เมื่อนำมา ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยืดด้วยเครื่องทดสอบ universal testing machine โดยใช้ load cell ขนาด 1 kN อัตราเร็วในการดึง 1 mm/min ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงยืดของ TPS สูตรต่าง ๆ

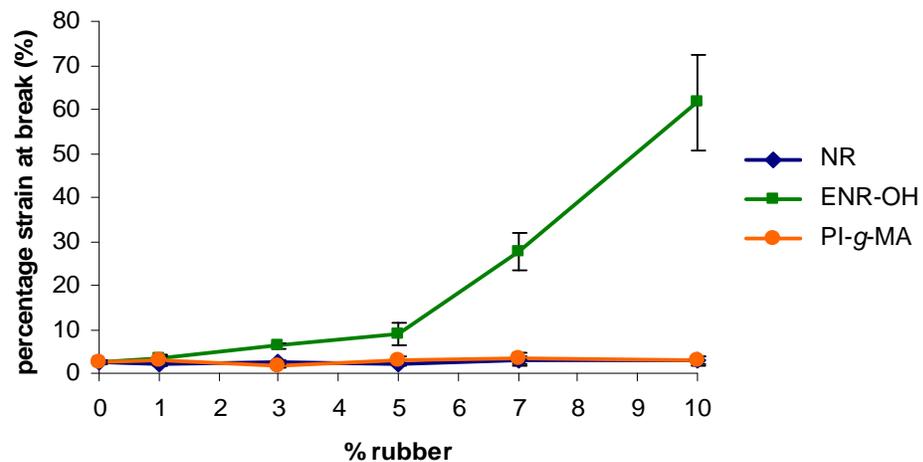
สูตร	Young's modulus (MPa)		tensile strength (MPa)		percentage strain at break	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
TPS-ORB	714.33	23.91	16.94	2.25	2.67	0.45
TPS-1NR	699.89	34.69	13.17	2.51	2.00	0.47
TPS-3NR	645.45	45.23	14.13	3.40	2.40	0.68
TPS-5NR	577.98	43.80	12.58	2.89	2.31	0.68
TPS-7NR	565.15	42.81	14.38	2.61	2.93	0.69
TPS-10NR	468.88	39.90	10.22	1.86	2.77	1.07
TPS-1ENR-OH	475.28	27.05	12.85	0.80	3.37	0.32
TPS-3ENR-OH	273.74	21.96	8.47	0.46	6.25	0.58
TPS-5ENR-OH	246.45	17.19	8.32	0.56	8.88	2.57
TPS-7ENR-OH	103.61	9.94	4.76	0.20	27.76	4.32
TPS-10ENR-OH	41.99	7.25	3.38	0.32	61.52	10.95
TPS-1PI-g-MA	661.70	42.05	14.12	3.22	3.04	1.15
TPS-3PI-g-MA	672.87	45.95	12.69	2.57	1.82	0.51
TPS-5PI-g-MA	529.81	34.40	11.48	1.95	2.97	0.94
TPS-7PI-g-MA	353.97	42.04	8.08	1.80	3.26	1.40
TPS-10PI-g-MA	174.67	10.39	5.23	0.56	2.93	0.70



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Young's modulus กับปริมาณของยางที่ใช้ในแต่ละชนิดในการเตรียมชิ้นงาน TPS



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง tensile strength กับปริมาณของยางที่ใช้ในแต่ละชนิดในการเตรียมชิ้นงาน TPS



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง percentage strain at break กับปริมาณของยางที่ใช้ในแต่ละชนิดในการเตรียมชิ้นงาน TPS

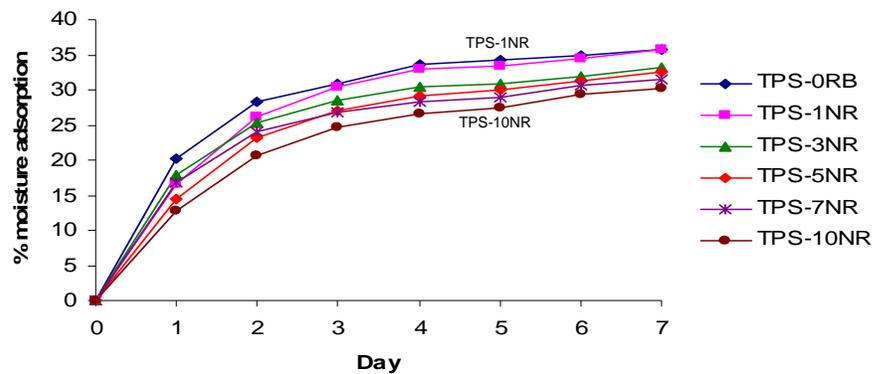
จากรูปที่ 4.19, 4.20 และ 4.21 จะเห็นได้ว่า สำหรับ TPS ในระบบยางแต่ละชนิด เมื่อระบบมีปริมาณยางมากขึ้นจะทำให้ค่า Young's modulus และ tensile strength จะลดลง ส่วนค่า percentage strain at break จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความเข้ากันได้ระหว่างแป้งกับยาง 3 ชนิด ได้แก่ NR, ENR-OH และ PI-g-MA จะเห็นได้ว่า TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น NR มี

interaction ระหว่างแป้งกับยางน้อยที่สุด เนื่องจาก interaction ที่ไม่ตีระหว่างแป้งซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วกับ NR ซึ่งเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว ทำให้ชิ้นงาน TPS ในระบบนี้มีความแข็งและความเปราะลดลงไม่มากนัก แม้จะมีปริมาณ NR เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า Young's modulus และ tensile strength มีแนวโน้มสูงที่สุด แต่ค่า percentage strain at break มีแนวโน้มต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับ TPS ในระบบยางชนิดอื่นที่ปริมาณเท่ากัน ส่วน TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น PI-g-MA มี interaction ระหว่างแป้งกับยางดีกว่า TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น NR โดยสังเกตได้จากค่า Young's modulus และ tensile strength มีค่าน้อยกว่า แต่ค่า percentage strain at break มีค่ามากกว่าของ TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น NR ที่ปริมาณเท่ากัน แสดงถึง interaction ที่ดีขึ้นระหว่างแป้งกับ PI-g-MA เนื่องมาจากส่วนของ maleic anhydride เป็นส่วนของโมเลกุลที่มีขั้วที่สามารถทำปฏิกิริยาได้โดยตรงกับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของแป้งโดยการเปิดวง maleic anhydride แล้วทำปฏิกิริยาต่อไปเป็นหมู่ ester ซึ่งสามารถเป็นสายโซ่เชื่อมขวางกับโมเลกุลของแป้งที่อยู่ข้างเคียงได้ ในส่วนของค่า percentage strain at break ของ TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น PI-g-MA จะสังเกตได้ว่าค่า percentage strain at break มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของการเชื่อมขวางของหมู่ maleic anhydride ใน PI-g-MA กับโมเลกุลของแป้งที่อยู่ข้างเคียงกัน ส่งผลให้เวลาชิ้นงานได้รับแรงดึงยืด โมเลกุลของแป้งและยางจะเลื่อนไถลตามแนวแรงดึงยืดได้อย่างไม่เต็มที่ เมื่อพิจารณาผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยืดของ TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น ENR-OH จะเห็นได้ว่า TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น ENR-OH นั้นมี interaction ระหว่างแป้งกับยางดีที่สุด โดยสังเกตได้จากค่า Young's modulus และ tensile strength มีค่าน้อยที่สุด แต่ค่า percentage strain at break มีค่าสูงที่สุด เมื่อเทียบกับ TPS ในระบบยางชนิดอื่น ถึงแม้ว่า ENR-OH จะทำปฏิกิริยากับแป้งแบบ 2° bonding โดยการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้ง แต่เนื่องจากทั้ง ENR-OH และแป้งต่างก็มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโมเลกุล และปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลของ ENR-OH ที่สังเคราะห์ได้นี้มีสูงถึง 12.38% เมื่อเทียบกับ PI-g-MA ซึ่งทำปฏิกิริยากับแป้งแบบ 1° bonding โดยการเปิดวง maleic anhydride จากนั้นทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในแป้งจนเกิดหมู่ ester แต่ปริมาณของ maleic anhydride ใน PI-g-MA มีเพียง 1.03% เท่านั้น เหตุนี้จึงทำให้ TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น ENR-OH มี interaction ระหว่างแป้งกับยางดีที่สุด นอกจากนี้ผลของค่า percentage strain at break ของ TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น ENR-OH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากผลของการมี interaction ที่ตีระหว่างแป้งกับ ENR-OH ทำให้โมเลกุลของแป้งและยางสามารถเลื่อนไถลได้มาก ก่อนที่ชิ้นงานจะขาดออกจากกันเมื่อได้รับแรงดึง

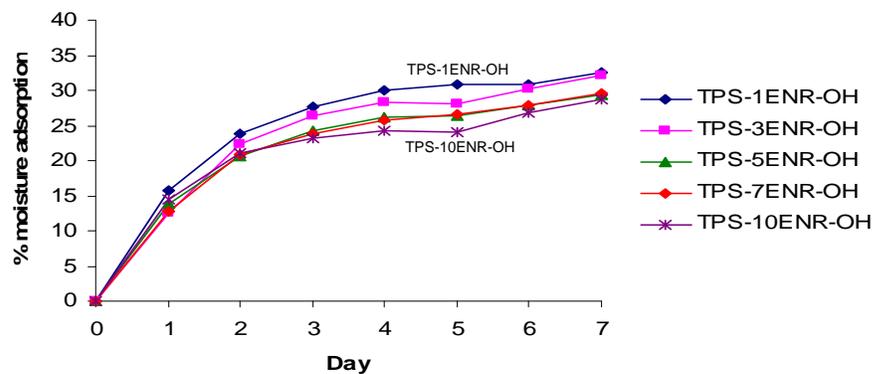
### ตอนที่ 3 การศึกษาปริมาณการดูดความชื้นของชิ้นงาน thermoplastic starch (TPS)

การวิเคราะห์ปริมาณการดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติมยางต่างชนิดกันและมีสัดส่วนแตกต่างกัน

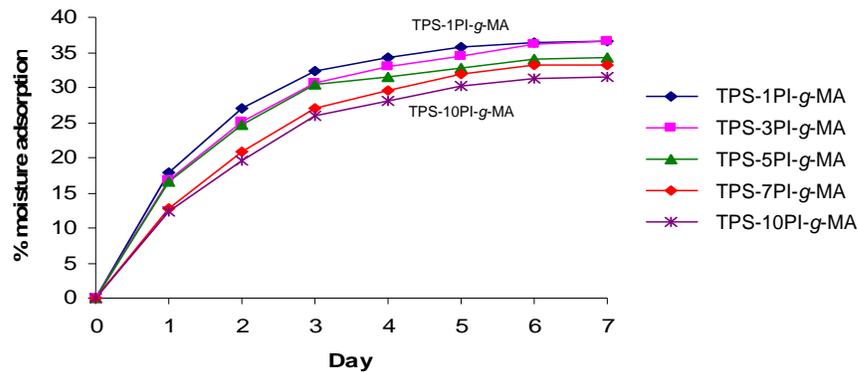
จากการนำชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS ที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก และปรับระดับของสารเติมแต่งซึ่งได้แก่ชนิดและปริมาณของยางให้แตกต่างกันมา ทำการศึกษาปริมาณการดูดความชื้น โดยการเก็บในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่ 53% จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปทุกๆ วันเป็นเวลา 7 วัน แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็น % moisture adsorption ได้ผลการทดลองดังนี้



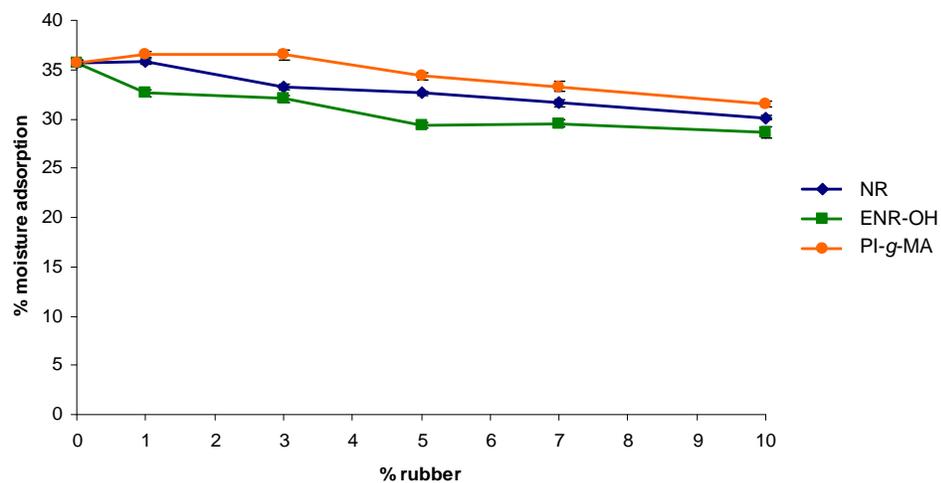
รูปที่ 4.22 % moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น NR ในแต่ละวัน



รูปที่ 4.23 % moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น ENR-OH ในแต่ละวัน



รูปที่ 4.24 % moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ในระบบที่มีสารเติมแต่งเป็น PI-g-MA ในแต่ละวัน



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง % moisture adsorption กับปริมาณของยางที่ใช้ในแต่ละชนิด ในการเตรียมชิ้นงาน TPS ในระยะเวลาทั้งสิ้น 7 วัน

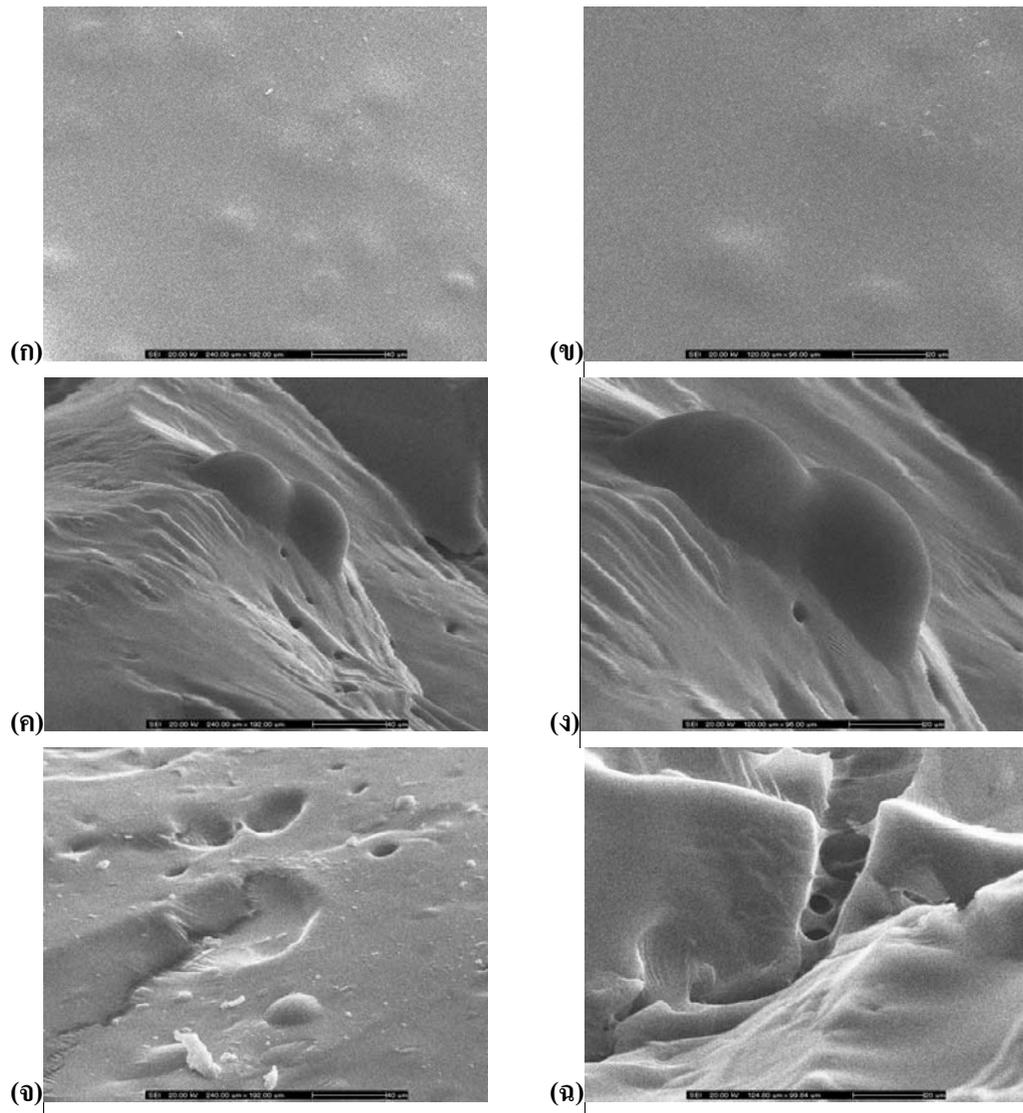
จากรูปที่ 4.22, 4.23 และ 4.24 จะเห็นได้ว่าชิ้นงาน TPS ทุกระบบเริ่มอิ่มตัวจากการดูดความชื้นในวันที่ 4 ของการทดลอง นอกจากนี้สำหรับ TPS แต่ละระบบจะมี % moisture adsorption ลดลงเมื่อระบบนั้นมีปริมาณยางเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากส่วนของยางเป็นส่วนที่มีความเป็น hydrophobic มากกว่าความเป็น hydrophilic ดังนั้นปริมาณยางเพิ่มขึ้นจะมีส่วนทำให้ระบบมีความเป็น hydrophobic เพิ่มขึ้น จึงทำให้การดูดความชื้นของชิ้นงานมีค่าลดลง ในส่วนของการเปรียบเทียบผลของชนิดและปริมาณของยางต่อ % moisture adsorption สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าค่า % moisture adsorption ของ TPS ในระบบของยางแต่ละ

ชนิดมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบที่ปริมาณการเติมยางที่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นเพราะผลต่างของ interaction ระหว่างยางกับแป้งนั้น ไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS มากนัก

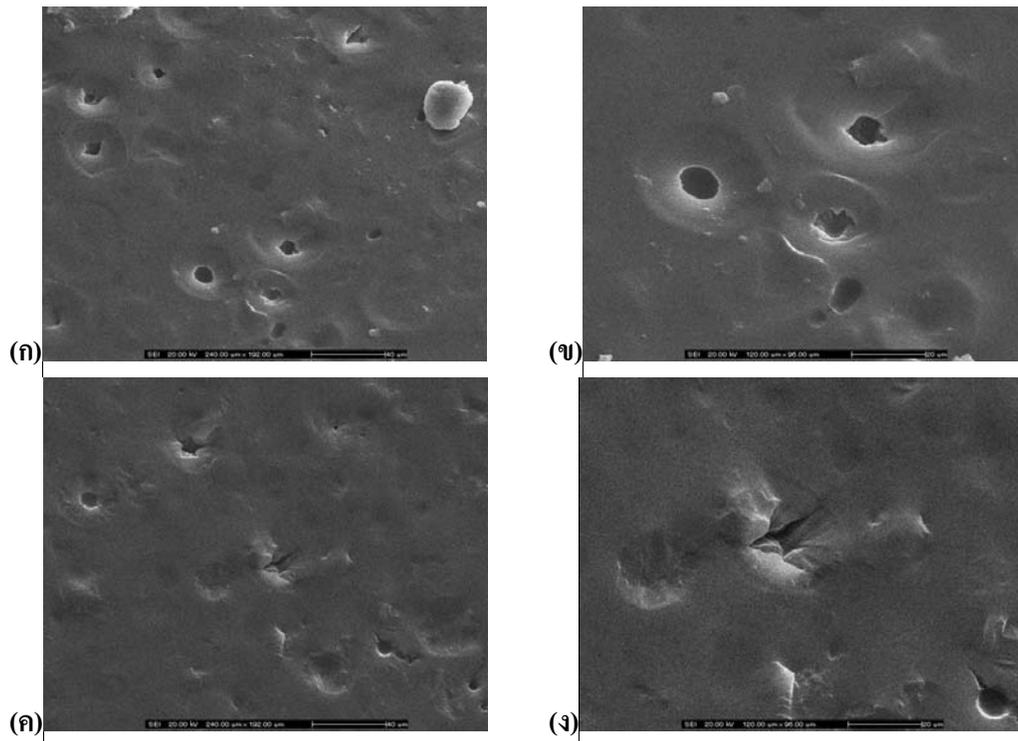
#### ตอนที่ 4 การวิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยา

##### 1. การศึกษาลักษณะพื้นผิวรอยแตกหักของ TPS เมื่ออุณหภูมิของยางยังอยู่ในระบบ

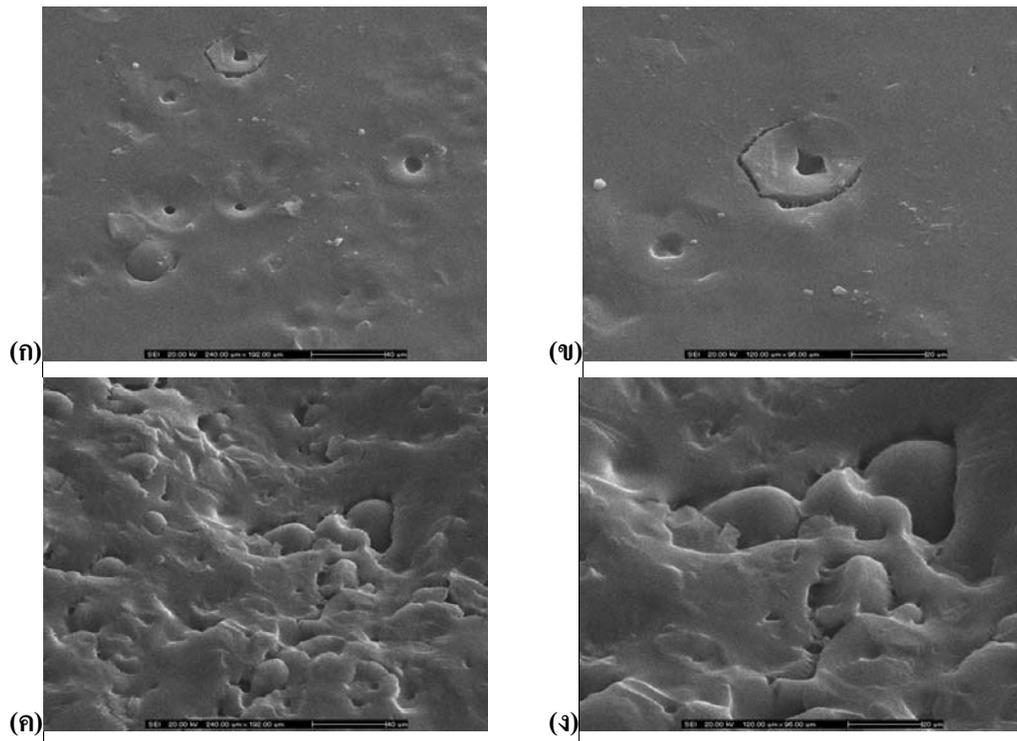
ผิวหน้าของชิ้นงานสูตรการผสมต่าง ๆ ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก เมื่อนำมาศึกษาลักษณะพื้นผิวรอยแตกหักโดยใช้เทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) ได้ผลดังรูปที่ 4.26, 4.27 และ 4.28 แสดงผลของปริมาณการเติม NR, ENR-OH และ PI-g-MA ที่แตกต่างกันตามลำดับ



**รูปที่ 4. 26** SEM micrograph แสดงผลของปริมาณการเติม NR ที่แตกต่างกันก่อนทำ soxhlet extraction ด้านซ้ายกำลังขยาย 500 เท่า และด้านขวากำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) และ (ข) NR = 0% (ค) และ (ง) NR = 3% (จ) และ (ฉ) NR = 7%



รูปที่ 4.27 SEM micrograph แสดงผลของปริมาณการเติม ENR-OH ที่แตกต่างกันก่อนทำ soxhlet extraction ด้านซ้ายกำลังขยาย 500 เท่า และด้านขวากำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) และ (ข) ENR-OH = 3% (ค) และ (ง) ENR-OH = 7%

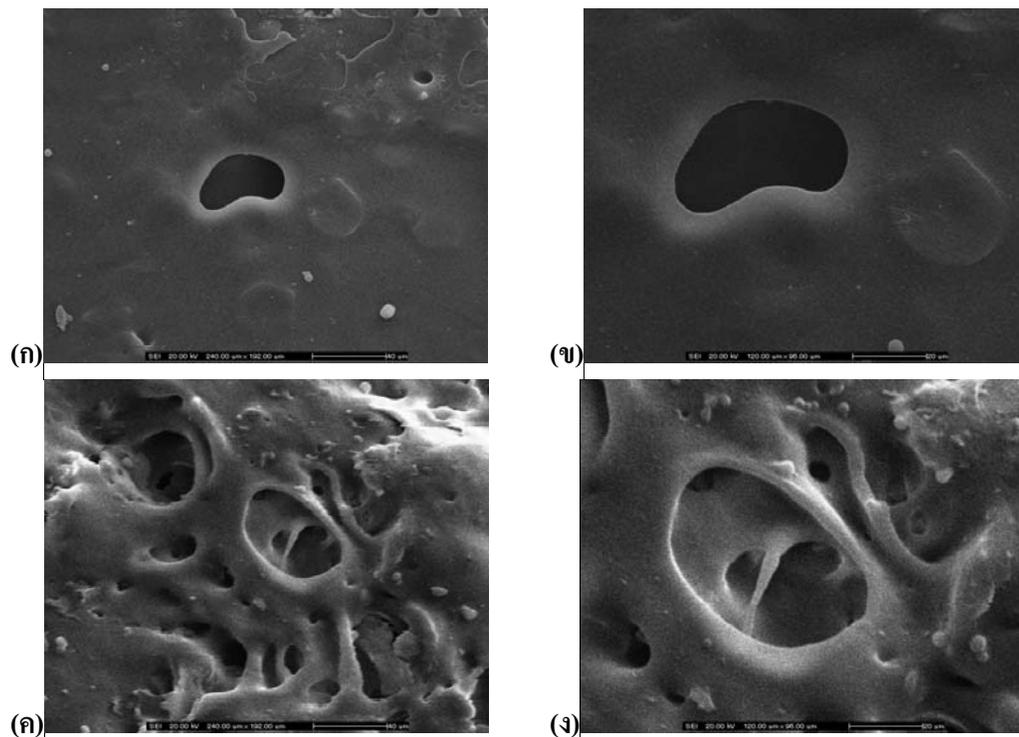


รูปที่ 4.28 SEM micrograph แสดงผลของปริมาณการเติม PI-g-MA ที่แตกต่างกันก่อนทำ soxhlet extraction ด้านซ้ายกำลังขยาย 500 เท่า และด้านขวากำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) และ (ข) PI-g-MA = 3% (ค) และ (ง) PI-g-MA = 7%

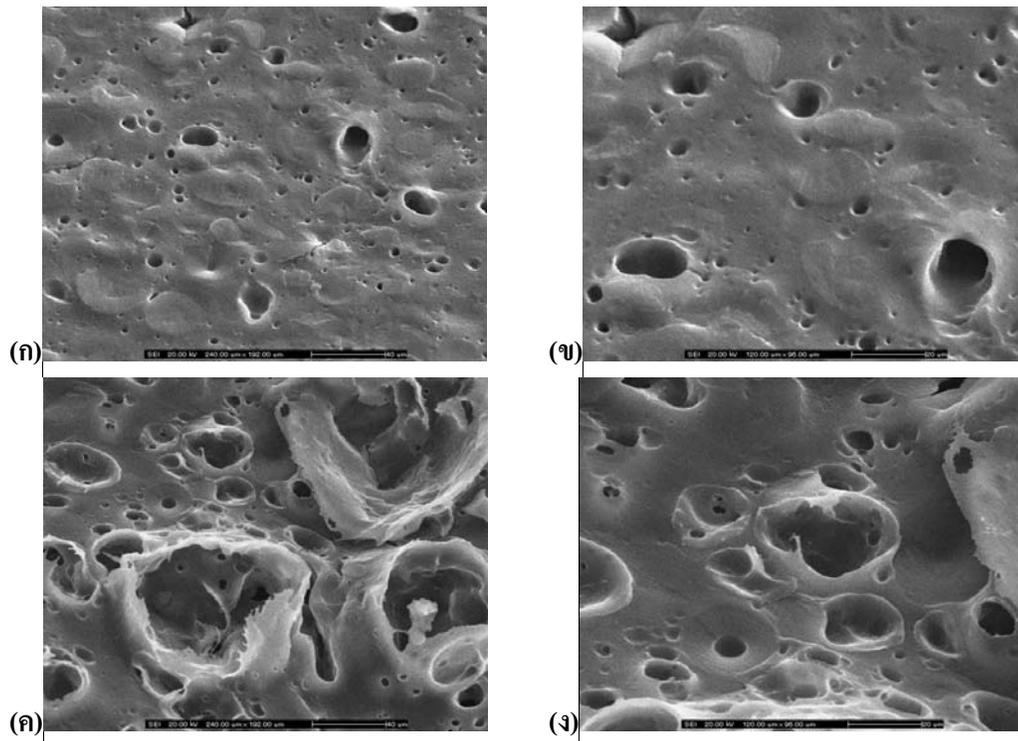
จากรูปที่ 4.26 เมื่อพิจารณาในกรณีที่ไม่มี NR ผสมอยู่ในชิ้นงาน จะเห็นได้ว่า ผิวหน้าของชิ้นงานที่มีการแตกหักนั้นค่อนข้างเรียบ แต่เมื่อมี NR ผสมในชิ้นงานในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้พื้นผิวของชิ้นงานมีความขรุขระมากขึ้นเนื่องมาจากการหลุดออกของ NR ในส่วนของลักษณะการหลุดออกของ NR ใน TPS จะเห็นได้ว่า ร่องรอยการหลุดออกของ NR จะหลุดออกแบบเป็นชั้น ๆ ส่งผลให้เกิดหลุมอย่างเห็นได้ชัด [23] ในกรณีนี้แสดงให้เห็นว่า NR มี interaction กับแป้งในลักษณะที่แย่มากที่สุด จากรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่า เมื่อระบบมี ENR-OH ในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้ชิ้นงานมีความขรุขระมากขึ้น แต่ในกรณีนี้ ความขรุขระส่วนใหญ่ที่มีลักษณะเหมือนวงแหวนจะมาจากการเปลี่ยนรูปร่าง (deform) ของเนื้อยางซึ่งเกิดจากการที่ยางได้รับความร้อนทำให้โมเลกุลของยางเกิดการขยายตัว จากนั้นเมื่อขึ้นรูป TPS ออกมาเป็นชิ้นงาน ยางจะเย็นตัวลงทำให้โมเลกุลของยางหดตัว แต่การหดตัวนี้โมเลกุลของยางชนิดนี้จะสามารถเกิด interaction กับโมเลกุลของแป้งได้ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ดังนั้นจึงทำให้โมเลกุลของยางถูกยึดติดกับโมเลกุลของแป้งที่ล้อมรอบอยู่ ส่งผลให้เกิด

รูตรงกลางของรูปวงแหวน โดยที่เส้นรอบวงของวงแหวนซึ่งหมายถึงผิวสัมผัสระหว่างเฟสของยางกับเฟสของแป้งจะไม่มีรอยขาดออกจากกันเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.28 ซึ่งเป็นระบบของ TPS ที่มี PI-g-MA เป็นสารเติมแต่ง จะเห็นได้ว่าแม้ PI-g-MA จะทำปฏิกิริยากับแป้งโดยการเปิดวง maleic anhydride แล้วสร้างพันธะกับโมเลกุลของแป้ง แต่ปริมาณของหมู่ maleic anhydride ที่น้อยมากทำให้ interaction ระหว่าง PI-g-MA กับแป้งมีความแข็งแรงน้อยกว่า interaction ระหว่าง ENR-OH กับแป้ง ดังนั้นจึงทำให้เส้นรอบวงแหวนบางส่วนเกิดการขาดออกจากกัน ส่วนปริมาณ PI-g-MA ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พื้นผิวรอยแตกหักมีความขรุขระมากขึ้นเช่นกัน

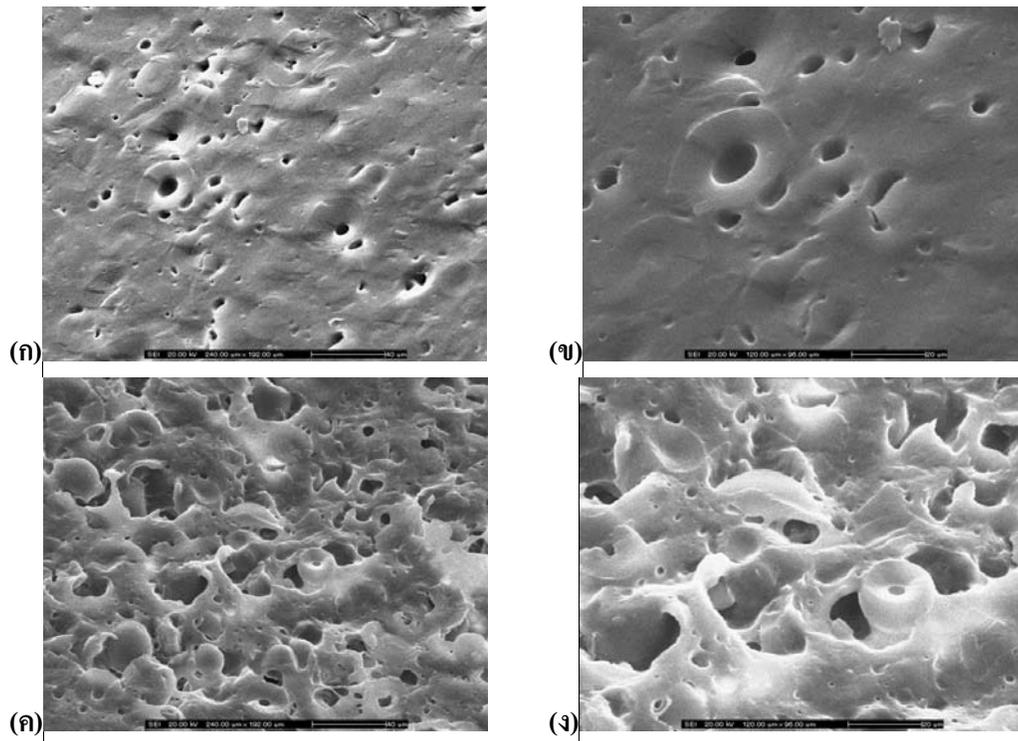
2. การศึกษาลักษณะพื้นผิวรอยแตกหักของ TPS เมื่ออุณหภูมิของยางถูกสกัดออกจากระบบจากการนำผิวหน้าของชิ้นงานสูตรการผสมต่าง ๆ ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกมาทำ soxhlet extraction เพื่อกำจัดอนุภาคของยางออกบริเวณพื้นผิวรอยแตกหัก จากนั้นนำมาศึกษาลักษณะพื้นผิวรอยแตกหักโดยใช้เทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) ได้ผลดังรูปที่ 4.29, 4.30 และ 4.31 แสดงผลของการหลุดออกของ NR, ENR-OH และ PI-g-MA ในปริมาณที่แตกต่างกันตามลำดับ



รูปที่ 4.29 SEM micrograph แสดงผลของปริมาณการเติม NR ที่แตกต่างกันหลังทำ soxhlet extraction ด้านซ้ายกำลังขยาย 500 เท่า และด้านขวากำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) และ (ข) NR = 3% (ค) และ (ง) NR = 7%



รูปที่ 4.30 SEM micrograph แสดงผลของปริมาณการเติม ENR-OH ที่แตกต่างกันหลังทำ soxhlet extraction ด้านซ้ายกำลังขยาย 500 เท่า และด้านขวากำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) และ (ข) ENR-OH = 3% (ค) และ (ง) ENR-OH = 7%



**รูปที่ 4.31** SEM micrograph แสดงผลของปริมาณการเติม PI-g-MA ที่แตกต่างกันหลังทำ soxhlet extraction ด้านซ้ายกำลังขยาย 500 เท่า และด้านขวากำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) และ (ข) PI-g-MA = 3% (ค) และ (ง) PI-g-MA = 7%

จากรูปที่ 4.29, 4.30 และ 4.31 จะเห็นได้ว่า เมื่อระบบมีปริมาณยางเพิ่มขึ้น หลังจากทำ soxhlet extraction จะทำให้บริเวณพื้นผิวรอยแตกหักมีลักษณะเป็นรูพรุนมากขึ้น เนื่องจากการชะของ toluene เมื่อพิจารณาบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของ TPS ในระบบยางต่างชนิดกันที่ปริมาณเท่ากัน จะเห็นได้ว่า ยางที่สามารถเกิด interaction กับแป้งได้จะมีพื้นผิวรอยแตกหักที่แตกต่างจากยางที่ไม่สามารถเกิด interaction กับแป้งได้ โดยยางที่สามารถเกิด interaction กับแป้งซึ่งได้แก่ ENR-OH และ PI-g-MA จะทำให้ลักษณะของแป้งบริเวณขอบของรูพรุนที่พื้นผิวรอยแตกหักมีการกระจายตัวที่ดีโดยมีลักษณะเป็นแผ่นขยายเป็นวงกว้าง เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่สามารถเกิด interaction กับแป้งซึ่งได้แก่ NR จะทำให้ลักษณะของแป้งบริเวณขอบของรูพรุนที่พื้นผิวรอยแตกหักมีการกระจายตัวที่ไม่ดีโดยจะมีลักษณะเรียบ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

Thermoplastic starch (TPS) ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR), hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH) และ polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA) เป็นสารเติมแต่งที่อัตราส่วน 1, 3, 5, 7, และ 10% โดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ในสัดส่วน 25% สามารถเตรียมได้จากกระบวนการ melt mixing การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ ENR-OH ด้วยเทคนิค fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) และ nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR) พบว่า สามารถสังเคราะห์ ENR-OH ได้จริง โดยมี % ring opening ประมาณ 12.38% ในการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระทำของชิ้นงาน TPS พบว่า TPS ในระบบที่ใช้ PI-g-MA มีความต้านทานต่อแรงกระทำที่ดีที่สุด รองลงมาได้แก่ TPS ในระบบที่ใช้ ENR-OH ส่วน TPS ในระบบที่ใช้ NR มีความต้านทานต่อแรงกระทำน้อยที่สุด เมื่อเทียบที่ปริมาณการเติมยางที่เท่ากันในทุกอัตราส่วน ทำให้ทราบว่าการปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระทำด้วยยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรนั้นมีประสิทธิภาพอย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงกระทำของ TPS ในระบบยางชนิดเดียวกันแต่มีปริมาณการเติมยางที่แตกต่างกัน จะพบว่า ปริมาณยางที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดย TPS ในระบบที่ใช้ PI-g-MA ที่ 3% สามารถปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระทำได้ดีที่สุด ในการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงของชิ้นงาน TPS พบว่า ปริมาณยางมากขึ้นทำให้ค่า Young's modulus และ tensile strength ลดลง ส่วนค่า percentage strain at break จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยยางที่สามารถมี interaction กับแป้งได้จะส่งผลให้ระบบมีความเข้ากันได้มากขึ้น ทำให้ค่า Young's modulus และ tensile strength มีค่าน้อยกว่าระบบที่ยางไม่มี interaction กับแป้ง ในขณะที่ค่า percentage strain at break จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า เมื่อเทียบที่ปริมาณการเติมยางเท่ากัน

ในการทดสอบสมบัติการดูดความชื้น โดยการเก็บชิ้นงาน TPS ไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 53% จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ วันเป็นเวลา 7 วัน แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็น % moisture adsorption พบว่า TPS ในระบบของยางแต่ละชนิดจะมี % moisture adsorption ลดลงเมื่อระบบนั้นมีปริมาณยางเพิ่มขึ้น ในส่วนของค่า % moisture

adsorption ของ TPS ในระบบของยางแต่ละชนิดเมื่อเทียบกับปริมาณการเติมยางที่เท่ากันจะมีค่าใกล้เคียงกัน

ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวรอยแตกหักของ TPS พบว่า ยาง ENR-OH และ PI-g-MA มี interaction ระหว่างยางกับแป้งดีกว่ายาง NR โดยสังเกตได้จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค SEM

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ยาง hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH) ที่มี % ring opening ในปริมาณ 12.38% ในขณะที่ polyisoprene-graft-maleic anhydride (PI-g-MA) ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้นมีหมู่ maleic anhydride อยู่เพียง 1.03% เท่านั้น ซึ่งปริมาณที่ไม่เท่ากันจะส่งผลให้การเปรียบเทียบผลของ interaction ระหว่างยางแต่ละชนิดกับแป้งต่อสมบัติต่าง ๆ ที่ทำการทดสอบนั้นไม่ชัดเจนนัก ดังนั้น ในงานวิจัยครั้งต่อไป หากสามารถทำให้ปริมาณของปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ที่ทำการทดสอบมีค่าเท่ากันแล้ว ตัวอย่างเช่น ในกรณีนี้ ถ้าทำให้ยาง ENR-OH มี % ring opening เท่ากับปริมาณของหมู่ maleic anhydride ใน PI-g-MA ก็อาจจะสามารถเปรียบเทียบผลของ interaction ระหว่างยางแต่ละชนิดกับแป้งต่อสมบัติต่าง ๆ ที่ทำการทดสอบได้ดียิ่งขึ้น

ในส่วนของการสังเคราะห์ ENR-OH ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดขึ้นในสารละลาย ซึ่งทั้งยางธรรมชาติและอนุพันธ์ของยางธรรมชาติมักจะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เท่านั้น และยังต้องใช้ตัวทำละลายในปริมาณมาก ดังนั้นควรมีวิธีอื่นที่ไม่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์หรือใช้ในปริมาณน้อยลง จะช่วยลดค่าใช้จ่ายได้อีกทางหนึ่ง

ในงานวิจัยครั้งต่อไปอาจเลือกใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดอื่น ๆ เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดของพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของ TPS ที่มียางเป็นสารเติมแต่ง เป็นต้น

### บรรณานุกรม

1. อนันต์ เกษมพันธุ์, และคณะ, แผนธุรกิจ พลาสติกย่อยสลายได้, โครงการบัณฑิตศึกษา สาขา MBA คณะพาณิชยศาสตร์การบัญชี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2542.
2. Xiaofei Ma, Jiugao Yu. “The plasticizers containing amide groups for thermoplastic starch.” Carbohydrate Polymers, Volume 57, Issue 2, 30 August 2004, Pages 197-203.
3. Xiaofei Ma, Jiugao Yu and John F. Kennedy, “Studies on the properties of natural fibers-reinforced thermoplastic starch composites”. Carbohydrate Polymers, Volume 62, Issue 1, 17 October 2005, Pages 19-24.
4. กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูด ปิยะจอมขวัญ, เทคโนโลยีของแป้ง, พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ ๑, 2543.
5. Wikipedia, “starch”, <http://en.wikipedia.org/wiki/Starch>, Accessed 3 April 2007.
6. Oracle ThinkQuest, “carbohydrates”, <http://library.thinkquest.org/3659/orgchem/carbohydrates.html>, Accessed 3 April 2007.
7. Martin Chaplin, “amylopectin”, <http://www.lsbu.ac.uk/water/hysta.html>, Accessed 3 April 2007.
8. Wenbo Jiang, Xiuying Qiao and Kang Sun, “Mechanical and thermal properties of thermoplastic acetylated starch/poly(ethylene-co-vinyl alcohol) blends.”, Carbohydrate Polymers, Volume 65, Issue 2, 25 July 2006, Pages 139-143.
9. Nolan-ITU Pty Ltd, “Thermoplastic Starch”, <http://www.environment.gov.au/settlements/publications/waste/degradables/biodegradable/chapter2.html>, Accessed 5 April 2007
10. A.J.F. Carvalho, A. Gandini and A.A.S. Curvelo, “Surface chemical modification of thermoplastic starch : reactions with isocyanates, epoxy function and stearoyl chloride.” Industrial Crops and products. Article in press 2004.
11. A.L. Da Róz, A.J.F. Carvalho, A. Gandini and A.A.S. Curvelo, “The effect of plasticizers on thermoplastic starch compositions obtained by melt processing”, Carbohydrate Polymers, Volume 63, Issue 3, 3 March 2006, Pages 417-424.

12. N. Follain, C. Joly, P. Dole and C. Bliard, "Properties of starch based blends. Part 2. Influence of poly vinyl alcohol addition and photocrosslinking on starch based materials mechanical properties.", Carbohydrate Polymers, Volume 60, Issue 2, 6 May 2005, Pages 185-192.
13. Chang-Hyeon Kim, Eui-Jun Choi and Jung-Ki Park, "Effect of PEG Molecular Weight on the Tensile Toughness of Starch/PCL/PEG Blends", Apply Polymer Science, Volume 77, 2000, Pages 2049-2056.
14. พงษ์ภักดิ์ แสงอุทัย, "Natural rubber, ENR, polyisoprene", <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertec.htm>, Accessed 7 April 2007.
15. Abbott Laboratories S.A (PTY) LTD, "Natural rubber", <http://allergyadvisor.com/Educational/Nov06.htm>, Accessed 12 January 2008.
16. David Blicq, "Natural rubber", <http://xnet.rrc.mb.ca/davidb/examples.htm>, Accessed 12 January 2008.
17. I. R. Gelling. "Modification of natural rubber latex with peracetic acid." Rubber Chemistry and Technology, 58, 86-96 (1985).
18. A.S. Hashim and S. Kohjiya, "Preparation and properties of epoxidized natural rubber." Kautsch. Gummi. Kunstst., 46, 208-213 (1993).
19. The University of Southern Mississippi, "polyisoprene", <http://www.pslc.ws/macrog/isoprene.htm>, Accessed 8 April 2007
20. Travis J. Keener, "Maleated polyethylene", [www.epolene.com](http://www.epolene.com), Accessed 27 June 2006
21. 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, Volume 25, Issue 5, August 2006, Pages 656-667.
22. Natthaporn Suraphat, Wanchai Lerdwijitjarud, Amnard Sittattrakul. "Influence of clay on mechanical properties and moisture sensitivity of thermoplastic starch." Department of Materials Science and Engineering, Silpakorn University, 2006.
23. A.J.F. Carvalho, A.E. Job, N. Alves, A.A.S. Curvelo, A. Gandini. "Thermoplastic starch/natural rubber blends." Carbohydrate Polymers, Volume 53, Issue 1, July 2003, Pages 95-99.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการผสม

## 1. การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการผสม TPS ในระบบยาง NR และ ENR-OH

ตารางที่ ก.1 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมแป้ง glycerol และยางแต่ละชนิด

สูตร	ชนิดของยาง	สัดส่วนของยางที่ถูกเติม (% w/w)	น้ำหนักที่ใช้ (g)		
			แป้ง	glycerol	ยาง
TPS-0RB	No rubber	0	37.500	12.563	0.00
TPS-1NR	NR	1	37.125	12.437	0.50
TPS-3NR	NR	3	36.375	12.186	1.50
TPS-5NR	NR	5	35.625	11.935	2.50
TPS-7NR	NR	7	34.875	11.683	3.50
TPS-10NR	NR	10	33.750	11.306	5.00
TPS-1ENR-OH	ENR-OH	1	37.125	12.437	0.50
TPS-3ENR-OH	ENR-OH	3	36.375	12.186	1.50
TPS-5ENR-OH	ENR-OH	5	35.625	11.935	2.50
TPS-7ENR-OH	ENR-OH	7	34.875	11.683	3.50
TPS-10ENR-OH	ENR-OH	10	33.750	11.306	5.00

### หมายเหตุ

การผสมทุก ๆ ระบบจะใช้ glycerol ในสัดส่วน 25% ของน้ำหนักระบบที่หักน้ำหนักของยางออกไปแล้ว ในขณะที่การใส่ยางจะคิดเป็น % ของน้ำหนักระบบทั้งหมด

### ตัวอย่างการคำนวณ

#### -ระบบ TPS-0RB

จากน้ำหนักรวมของสารตั้งต้นทั้งหมดเท่ากับ 50 g เมื่อมีแป้งอยู่ 75% จะได้ว่า  
 จะต้องชั่งแป้งในการผสมปริมาณเท่ากับ  $50 \text{ g} \times (75/100) = 37.5 \text{ g}$   
 จะต้องชั่ง glycerol ในปริมาณเท่ากับ  $50 \text{ g} \times (25/100) = 12.5 \text{ g}$   
 แต่เนื่องจาก glycerol ในขวดมีปริมาณเท่ากับ 99.5% w/w นั่นคือ  
 จะต้องชั่ง glycerol ในการผสมปริมาณเท่ากับ  $12.5 \text{ g} \times (100/99.5) = 12.563 \text{ g}$   
 ดังนั้น ถ้าระบบมีน้ำหนักรวม 50 g จะต้องชั่งแป้ง 37.5 g และ glycerol 12.563 g

**-ระบบ TPS-5NR หรือ TPS-5ENR-OH**

จากน้ำหนักรวมของสารตั้งต้นทั้งหมดเท่ากับ 50 g เมื่อมียางอยู่ 5% จะได้ว่า

$$\text{จะต้องชั่งยางในการผสมปริมาณเท่ากับ} \quad 50 \text{ g} \times (5/100) \quad = \quad 2.5 \text{ g}$$

$$\text{ดังนั้น ในระบบจะเหลือน้ำหนักรวม (แป้งและ glycerol) เท่ากับ} \quad 50 \text{ g} - 2.5 \text{ g} \quad = \quad 47.5 \text{ g}$$

เมื่อมีแป้งอยู่ 75% จะได้ว่า

$$\text{จะต้องชั่งแป้งในการผสมปริมาณเท่ากับ} \quad 47.5 \text{ g} \times (75/100) \quad = \quad 35.625 \text{ g}$$

$$\text{และจะต้องมี glycerol ในปริมาณเท่ากับ} \quad 47.5 \text{ g} - 35.625 \text{ g} \quad = \quad 11.875 \text{ g}$$

แต่เนื่องจาก glycerol ในขวดมีปริมาณเท่ากับ 99.5% w/w นั่นคือ

$$\text{จะต้องชั่ง glycerol ในการผสมปริมาณเท่ากับ} \quad 11.875 \text{ g} \times (100/99.5) \quad = \quad 11.935 \text{ g}$$

ดังนั้น ถ้าระบบมีน้ำหนักรวม 50 g จะต้องชั่งแป้ง 35.625 g, glycerol 11.935 g และยาง 2.5 g

**2. การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการผสม TPS ในระบบยาง PI-g-MA**

**ตารางที่ ก.2** อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมแป้ง glycerol และ master batch

สูตร	ชนิดของยาง	สัดส่วนของยางที่ถูกเติม (% w/w)	น้ำหนักที่ใช้ (g)		
			แป้ง	glycerol	master batch
TPS-1PI-g-MA	PI-g-MA	1	35.625	12.437	2
TPS-3PI-g-MA	PI-g-MA	3	31.875	12.186	6
TPS-5PI-g-MA	PI-g-MA	5	28.125	11.935	10
TPS-7PI-g-MA	PI-g-MA	7	24.375	11.683	14
TPS-10PI-g-MA	PI-g-MA	10	18.750	11.306	20

**หมายเหตุ**

ใน master batch 50 g จะประกอบด้วยแป้ง 75% และ PI-g-MA 25% การผสมทุก ๆ ระบบจะใช้ glycerol ในสัดส่วน 25% ของน้ำหนักระบบที่หักน้ำหนักของยางออกไปแล้ว ในขณะที่ใส่ยางจะคิดเป็น % ของน้ำหนักระบบทั้งหมด

**ตัวอย่างการคำนวณ**

**-ระบบ TPS-5PI-g-MA**

จากน้ำหนักรวมของสารตั้งต้นทั้งหมดเท่ากับ 50 g เมื่อมียางอยู่ 5% จะได้ว่า

$$\text{จะต้องชั่งยางในการผสมปริมาณเท่ากับ} \quad 50 \text{ g} \times (5/100) \quad = \quad 2.5 \text{ g}$$

ดังนั้น ในระบบจะเหลือน้ำหนักรวม (แป้งและ glycerol) เท่ากับ  $50 \text{ g} - 2.5 \text{ g} = 47.5 \text{ g}$   
 แต่ในกรณีนี้จะต้องชั่งจาก master batch ซึ่งมียาง PI-g-MA 25% จะได้ว่า  
 จะต้องชั่ง master batch ในปริมาณเท่ากับ  $2.5 \text{ g} \times (50 \text{ g}/12.5 \text{ g}) = 10 \text{ g}$   
 เพื่อที่จะให้ได้ยาง PI-g-MA ในปริมาณเท่ากับ 2.5 g และจะได้ว่าใน master batch 10 g จะมีเนื้อ  
 แป้งอยู่เท่ากับ  $10 - 2.5 = 7.5 \text{ g}$   
 จากในระบบที่เหลือน้ำหนักรวม (แป้งและ glycerol) เท่ากับ 47.5 g  
 เมื่อมีแป้งอยู่ 75% จะได้ว่า  
 จะต้องชั่งแป้งในการผสมปริมาณเท่ากับ  $47.5 \text{ g} \times (75/100) = 35.625 \text{ g}$   
 แต่เนื่องจาก master batch 10 g จะมีเนื้อแป้งอยู่เท่ากับ 7.5 g จะได้ว่า  
 จะต้องชั่งแป้งในการผสมปริมาณเท่ากับ  $35.625 \text{ g} - 7.5 \text{ g} = 28.125 \text{ g}$   
 ส่วน glycerol จะต้องชั่งในปริมาณเท่ากับ  $47.5 \text{ g} - 35.625 \text{ g} = 11.875 \text{ g}$   
 แต่เนื่องจาก glycerol ในขวดมีปริมาณเท่ากับ 99.5% w/w นั่นคือ  
 จะต้องชั่ง glycerol ในการผสมปริมาณเท่ากับ  $11.875 \text{ g} \times (100/99.5) = 11.935 \text{ g}$   
 ดังนั้น ถ้าระบบมีน้ำหนักรวม 50 g จะต้องชั่งแป้ง 28.125 g, glycerol 11.935 g และ master batch  
 10 g

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบสมบัติน้ำความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS แต่ละระบบ

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-ORB

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
0% rubber	1	1	3.82	10.72	40.95	0.030	0.73
	2	3	3.54	10.52	37.24	0.027	0.73
	3	4	3.60	10.58	38.09	0.025	0.66
	4	5	3.54	10.60	37.52	0.028	0.75
	5	6	3.48	10.50	36.54	0.025	0.68
	6	7	3.70	10.70	39.59	0.025	0.63
	7	8	3.60	10.60	38.16	0.027	0.71
	8	9	3.50	10.80	37.80	0.023	0.61
	9	10	3.74	10.72	40.09	0.028	0.70
	10	11	3.58	10.60	37.95	0.025	0.66
	11	12	3.60	10.60	38.16	0.025	0.66
	12	14	3.60	10.30	37.08	0.027	0.73
	13	15	3.48	10.78	37.51	0.028	0.75
	14	16	3.74	10.58	39.57	0.028	0.71
	15	17	3.64	10.48	38.15	0.027	0.71
	16	18	3.62	10.52	38.08	0.027	0.71
	17	19	3.62	10.62	38.44	0.025	0.65
	18	20	3.78	10.78	40.75	0.025	0.61
	19	21	3.70	10.64	39.37	0.025	0.64
						<b>Mean</b>	0.68
						<b>SD</b>	0.04

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-1NR

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
1% NR	1	2	3.60	10.48	37.73	0.028	0.74
	2	3	3.50	10.60	37.10	0.030	0.81
	3	4	3.64	10.70	38.95	0.028	0.72
	4	5	3.67	10.70	39.27	0.027	0.69
	5	6	3.76	10.56	39.71	0.027	0.68
	6	7	3.60	10.30	37.08	0.027	0.73
	7	8	3.70	10.84	40.11	0.027	0.67
	8	9	3.70	10.62	39.29	0.032	0.81
	9	10	3.62	10.70	38.73	0.030	0.77
	10	11	3.72	10.64	39.58	0.025	0.63
	11	12	3.64	10.80	39.31	0.025	0.64
	12	13	3.60	10.52	37.87	0.028	0.74
	13	14	3.78	10.80	40.82	0.032	0.78
	14	15	3.46	10.60	36.68	0.027	0.74
	15	16	3.68	10.58	38.93	0.033	0.85
	16	17	3.82	10.78	41.18	0.030	0.73
	17	18	3.58	10.70	38.31	0.027	0.70
	18	19	3.72	10.38	38.61	0.030	0.78
	19	20	3.82	10.30	39.35	0.028	0.71
	20	21	3.64	10.60	38.58	0.027	0.70
<b>Mean</b>							0.73
<b>SD</b>							0.06

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-3NR

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
3% NR	1	1	3.64	10.50	38.22	0.028	0.73
	2	2	3.58	10.80	38.66	0.030	0.78
	3	3	3.60	10.58	38.09	0.030	0.79
	4	4	3.70	10.60	39.22	0.030	0.76
	5	5	3.42	10.80	36.94	0.027	0.73
	6	6	3.42	10.50	35.91	0.032	0.89
	7	7	3.64	10.56	38.44	0.028	0.73
	8	8	3.40	10.64	36.18	0.027	0.75
	9	9	3.44	10.60	36.46	0.030	0.82
	10	10	3.60	10.40	37.44	0.032	0.85
	11	11	3.44	10.74	36.95	0.028	0.76
	12	12	3.60	10.60	38.16	0.032	0.84
	13	13	3.44	10.42	35.84	0.028	0.78
	14	14	3.52	10.66	37.52	0.030	0.80
	15	15	3.70	10.64	39.37	0.028	0.71
	16	16	3.44	10.58	36.40	0.027	0.74
	17	17	3.40	10.48	35.63	0.030	0.84
	18	18	3.54	10.24	36.25	0.030	0.83
	19	19	3.52	10.62	37.38	0.030	0.80
	20	20	3.48	10.42	36.26	0.028	0.77
						<b>Mean</b>	0.79
						<b>SD</b>	0.05

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-5NR

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
5% NR	1	1	3.60	10.48	37.73	0.030	0.80
	2	2	3.48	10.62	36.96	0.032	0.87
	3	3	3.50	10.30	36.05	0.032	0.89
	4	4	3.42	10.40	35.57	0.028	0.79
	5	5	3.66	10.34	37.84	0.030	0.79
	6	6	3.66	10.60	38.80	0.030	0.77
	7	7	3.68	10.42	38.35	0.030	0.78
	8	9	3.44	10.54	36.26	0.028	0.77
	9	10	3.76	10.66	40.08	0.033	0.82
	10	11	3.52	10.62	37.38	0.027	0.72
	11	13	3.46	10.72	37.09	0.028	0.75
	12	14	3.44	10.48	36.05	0.028	0.78
	13	15	3.40	10.40	35.36	0.030	0.85
	14	16	3.42	10.42	35.64	0.032	0.90
	15	18	3.52	10.60	37.31	0.028	0.75
	16	19	3.62	10.52	38.08	0.032	0.84
	17	20	3.42	10.60	36.25	0.030	0.83
	18	21	3.48	10.46	36.40	0.030	0.82
<b>Mean</b>							0.81
<b>SD</b>							0.05

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-7NR

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
7% NR	1	1	3.44	10.62	36.53	0.045	1.23
	2	2	3.40	10.70	36.38	0.042	1.15
	3	3	3.34	10.48	35.00	0.032	0.91
	4	4	3.62	10.68	38.66	0.033	0.85
	5	5	3.40	10.68	36.31	0.030	0.83
	6	6	3.52	10.56	37.17	0.030	0.81
	7	7	3.32	10.70	35.52	0.035	0.99
	8	8	3.42	10.52	35.98	0.040	1.11
	9	10	3.42	10.58	36.18	0.038	1.05
	10	11	3.36	10.64	35.75	0.037	1.03
	11	13	3.36	10.90	36.62	0.038	1.04
	12	14	3.54	10.82	38.30	0.037	0.97
	13	15	3.56	10.58	37.66	0.037	0.98
	14	16	3.40	10.52	35.77	0.033	0.92
	15	18	3.60	10.70	38.52	0.032	0.83
	16	19	3.54	10.50	37.17	0.030	0.81
	17	20	3.38	10.62	35.90	0.032	0.89
	18	21	3.52	10.72	37.73	0.032	0.85
	19	22	3.44	10.60	36.46	0.037	1.01
						<b>Mean</b>	0.96
						<b>SD</b>	0.12

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-10NR

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
10% NR	1	1	3.34	10.54	35.20	0.027	0.77
	2	2	3.40	10.48	35.63	0.037	1.04
	3	3	3.34	10.60	35.40	0.051	1.44
	4	4	3.40	10.52	35.77	0.029	0.81
	5	5	3.42	10.60	36.25	0.041	1.13
	6	6	3.36	10.72	36.02	0.029	0.81
	7	8	3.68	10.68	39.30	0.029	0.74
	8	9	3.32	10.62	35.26	0.031	0.88
	9	10	3.36	10.58	35.55	0.027	0.76
	10	11	3.38	10.40	35.15	0.031	0.88
	11	12	3.36	10.50	35.28	0.046	1.30
	12	13	3.46	10.58	36.61	0.031	0.85
	13	14	3.44	10.40	35.78	0.050	1.40
	14	15	3.60	10.62	38.23	0.029	0.76
	15	16	3.30	10.60	34.98	0.029	0.83
	16	17	3.54	10.62	37.59	0.053	1.41
	17	18	3.36	10.72	36.02	0.032	0.89
	18	19	3.60	10.68	38.45	0.031	0.81
	19	20	3.42	10.60	36.25	0.031	0.86
	20	21	3.40	10.60	36.04	0.041	1.14
						<b>Mean</b>	0.97
						<b>SD</b>	0.24

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-1ENR-OH

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
1% ENR-OH	1	2	3.72	10.66	39.66	0.047	1.19
	2	3	3.70	10.54	39.00	0.061	1.56
	3	4	3.86	10.50	40.53	0.051	1.26
	4	5	3.86	10.64	41.07	0.056	1.36
	5	6	3.70	10.60	39.22	0.051	1.30
	6	7	3.80	10.54	40.05	0.063	1.57
	7	8	3.70	10.62	39.29	0.072	1.83
	8	9	3.74	10.52	39.34	0.059	1.50
	9	10	3.70	10.60	39.22	0.065	1.66
	10	11	3.80	10.80	41.04	0.065	1.58
	11	12	3.74	10.54	39.42	0.054	1.37
	12	13	3.90	10.70	41.73	0.058	1.39
	13	14	3.90	10.60	41.34	0.044	1.06
	14	15	3.76	10.60	39.86	0.059	1.48
	15	16	3.68	10.50	38.64	0.056	1.45
	16	17	3.84	10.60	40.70	0.063	1.55
	17	18	3.70	10.60	39.22	0.052	1.33
	18	19	3.88	10.70	41.52	0.052	1.25
	19	20	3.74	10.64	39.79	0.054	1.36
<b>Mean</b>							1.42
<b>SD</b>							0.18

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-3ENR-OH

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
3% ENR-OH	1	1	3.66	10.90	39.89	0.065	1.63
	2	2	3.68	10.68	39.30	0.047	1.20
	3	3	3.70	10.46	38.70	0.045	1.16
	4	4	3.70	10.70	39.59	0.065	1.64
	5	5	3.70	10.70	39.59	0.054	1.36
	6	6	3.70	10.60	39.22	0.045	1.15
	7	7	3.74	10.70	40.02	0.051	1.27
	8	8	3.74	10.58	39.57	0.049	1.24
	9	9	3.84	10.60	40.70	0.051	1.25
	10	10	3.68	10.60	39.01	0.059	1.51
	11	11	3.78	10.44	39.46	0.049	1.24
	12	12	3.74	10.66	39.87	0.056	1.40
	13	13	3.78	10.66	40.29	0.049	1.22
	14	14	3.60	10.60	38.16	0.054	1.42
	15	15	3.80	10.60	40.28	0.049	1.22
	16	16	3.66	10.74	39.31	0.052	1.32
	17	17	3.76	10.70	40.23	0.047	1.17
	18	18	3.68	10.72	39.45	0.045	1.14
	19	20	3.62	10.66	38.59	0.042	1.09
						<b>Mean</b>	1.30
						<b>SD</b>	0.16

ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-5ENR-OH

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
5% ENR-OH	1	1	3.78	10.60	40.07	0.065	1.62
	2	2	3.84	10.60	40.70	0.049	1.20
	3	3	3.80	10.70	40.66	0.038	0.93
	4	4	3.74	10.60	39.64	0.047	1.19
	5	5	3.70	10.56	39.07	0.056	1.43
	6	6	3.70	10.50	38.85	0.049	1.26
	7	7	3.64	10.48	38.15	0.069	1.81
	8	8	3.70	10.44	38.63	0.065	1.68
	9	9	3.62	10.70	38.73	0.032	0.83
	10	10	3.60	10.54	37.94	0.047	1.24
	11	11	3.60	10.50	37.80	0.074	1.96
	12	12	3.76	10.50	39.48	0.061	1.55
	13	13	3.64	10.62	38.66	0.045	1.16
	14	14	3.74	10.46	39.12	0.054	1.38
	15	15	3.66	10.60	38.80	0.045	1.16
	16	16	3.70	10.56	39.07	0.047	1.20
	17	17	3.60	10.58	38.09	0.065	1.71
	18	18	3.60	10.60	38.16	0.052	1.36
	19	19	3.74	10.60	39.64	0.076	1.92
	20	20	3.66	10.60	38.80	0.030	0.77
						<b>Mean</b>	1.37
						<b>SD</b>	0.34

ตารางที่ ข.10 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-7ENR-OH

สูตร	ชิ้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
7% ENR-OH	1	1	3.40	10.60	36.04	0.037	1.03
	2	2	3.40	10.60	36.04	0.028	0.78
	3	3	3.50	10.50	36.75	0.027	0.73
	4	4	3.50	10.48	36.68	0.042	1.15
	5	5	3.34	10.60	35.40	0.050	1.41
	6	6	3.54	10.60	37.52	0.045	1.20
	7	7	3.38	10.60	35.83	0.040	1.12
	8	8	3.40	10.64	36.18	0.042	1.16
	9	10	3.36	10.60	35.62	0.037	1.04
	10	11	3.36	10.58	35.55	0.040	1.13
	11	12	3.52	10.60	37.31	0.051	1.37
	12	13	3.50	10.58	37.03	0.044	1.19
	13	14	3.36	10.56	35.48	0.028	0.79
	14	15	3.32	10.60	35.19	0.032	0.91
	15	16	3.40	10.46	35.56	0.040	1.12
	16	17	3.40	10.60	36.04	0.025	0.69
	17	18	3.60	10.60	38.16	0.038	1.00
	18	19	3.40	10.68	36.31	0.033	0.91
	19	20	3.34	10.68	35.67	0.042	1.18
						<b>Mean</b>	1.05
						<b>SD</b>	0.20

ตารางที่ ข.11 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-10ENR-OH

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
10% ENR-OH	1	1	3.50	10.44	36.54	0.047	1.29
	2	2	3.34	10.46	34.94	0.051	1.46
	3	3	3.34	10.40	34.74	0.048	1.38
	4	4	3.32	10.60	35.19	0.044	1.25
	5	5	3.32	10.40	34.53	0.045	1.30
	6	6	3.36	10.60	35.62	0.047	1.32
	7	7	3.42	10.68	36.53	0.038	1.04
	8	8	3.40	10.56	35.90	0.045	1.25
	9	9	3.34	10.50	35.07	0.052	1.48
	10	10	3.54	10.48	37.10	0.044	1.19
	11	11	3.36	10.06	33.80	0.045	1.33
	12	12	3.56	10.50	37.38	0.042	1.12
	13	13	3.26	10.40	33.90	0.044	1.30
	14	14	3.54	10.62	37.59	0.047	1.25
	15	15	3.54	10.44	36.96	0.040	1.08
	16	16	3.54	10.40	36.82	0.056	1.52
	17	17	3.50	10.50	36.75	0.049	1.33
	18	18	3.64	10.60	38.58	0.047	1.22
	19	19	3.32	10.52	34.93	0.047	1.35
	20	20	3.52	10.44	36.75	0.044	1.20
<b>Mean</b>							1.28
<b>SD</b>							0.13

ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-1PI-g-MA

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
1% PI-g-MA	1	1	3.49	10.64	37.13	0.052	1.40
	2	2	3.58	10.65	38.13	0.080	2.10
	3	3	3.54	10.16	35.97	0.045	1.25
	4	4	3.27	10.69	34.96	0.052	1.49
	5	5	3.39	10.75	36.44	0.045	1.23
	6	6	3.21	10.78	34.60	0.058	1.68
	7	7	3.26	10.68	34.82	0.065	1.87
	8	8	3.28	10.67	35.00	0.061	1.74
	9	9	3.20	10.70	34.24	0.047	1.37
	10	11	3.33	10.75	35.80	0.047	1.31
	11	12	3.50	10.71	37.49	0.072	1.92
	12	13	3.39	10.71	36.31	0.054	1.49
	13	14	3.24	10.52	34.08	0.045	1.32
	14	15	3.20	10.63	34.02	0.052	1.53
	15	16	3.39	10.72	36.34	0.063	1.73
	16	17	3.21	10.63	34.12	0.069	2.02
	17	18	3.22	10.71	34.49	0.044	1.28
	18	19	3.30	10.66	35.18	0.044	1.25
	19	20	3.22	10.71	34.49	0.061	1.77
						<b>Mean</b>	1.57
						<b>SD</b>	0.28

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-3PI-g-MA

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
3% PI-g-MA	1	1	3.58	10.75	38.49	0.049	1.27
	2	2	3.47	10.69	37.09	0.072	1.94
	3	3	3.22	10.69	34.42	0.045	1.31
	4	4	3.57	10.74	38.34	0.069	1.80
	5	5	3.24	10.77	34.89	0.067	1.92
	6	6	3.38	10.70	36.17	0.047	1.30
	7	7	3.44	10.71	36.84	0.067	1.82
	8	8	3.58	10.72	38.38	0.054	1.41
	9	9	3.35	10.74	35.98	0.070	1.95
	10	10	3.83	10.74	41.13	0.078	1.90
	11	11	3.37	10.72	36.13	0.074	2.05
	12	12	3.80	10.81	41.08	0.078	1.90
	13	14	3.28	10.64	34.90	0.074	2.12
	14	15	3.21	10.66	34.22	0.061	1.78
	15	16	3.43	10.74	36.84	0.061	1.66
	16	17	3.32	10.75	35.69	0.061	1.71
	17	18	3.23	10.74	34.69	0.067	1.93
	18	19	3.65	10.75	39.24	0.080	2.04
	19	20	3.24	10.75	34.83	0.067	1.92
						<b>Mean</b>	1.77
						<b>SD</b>	0.27

ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-5PI-g-MA

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
5% PI-g-MA	1	1	3.51	10.73	37.66	0.052	1.38
	2	2	3.69	10.62	39.19	0.052	1.33
	3	3	3.18	10.52	33.45	0.056	1.67
	4	4	3.75	10.71	40.16	0.061	1.52
	5	5	3.50	10.70	37.45	0.051	1.36
	6	6	3.77	10.75	40.53	0.049	1.21
	7	7	3.30	10.64	35.11	0.065	1.85
	8	8	3.37	10.69	36.03	0.052	1.44
	9	9	3.13	10.61	33.21	0.049	1.48
	10	10	3.58	10.77	38.56	0.052	1.35
	11	11	3.08	10.68	32.89	0.038	1.16
	12	12	3.12	10.67	33.29	0.052	1.56
	13	13	3.67	10.62	38.98	0.070	1.80
	14	14	3.45	10.64	36.71	0.056	1.53
	15	15	3.86	10.32	39.84	0.049	1.23
	16	16	3.16	10.70	33.81	0.059	1.74
	17	17	3.47	10.72	37.20	0.072	1.94
	18	18	3.27	10.76	35.19	0.065	1.85
	19	19	3.24	10.80	34.99	0.063	1.80
	20	20	3.15	10.80	34.02	0.052	1.53
						<b>Mean</b>	1.54
						<b>SD</b>	0.23

ตารางที่ ข.15 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-7PI-g-MA

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
7% PI-g-MA	1	1	3.43	10.70	36.70	0.063	1.72
	2	2	3.36	10.83	36.39	0.052	1.43
	3	3	3.39	10.67	36.17	0.037	1.02
	4	4	3.42	10.56	36.12	0.051	1.41
	5	5	3.51	10.69	37.52	0.037	0.99
	6	6	3.22	10.71	34.49	0.042	1.22
	7	7	3.30	10.71	35.34	0.051	1.44
	8	8	3.45	10.66	36.78	0.049	1.33
	9	9	3.44	10.58	36.40	0.045	1.24
	10	10	3.43	10.84	37.18	0.040	1.08
	11	11	3.55	10.76	38.20	0.038	0.99
	12	12	3.43	10.63	36.46	0.056	1.54
	13	14	3.32	10.70	35.52	0.054	1.52
	14	15	3.33	10.59	35.26	0.051	1.45
	15	16	3.38	10.69	36.13	0.049	1.36
	16	17	3.34	10.61	35.44	0.063	1.78
	17	18	3.46	10.83	37.47	0.032	0.85
	18	19	3.47	10.66	36.99	0.045	1.22
	19	20	3.40	10.68	36.31	0.052	1.43
						<b>Mean</b>	1.32
						<b>SD</b>	0.25

ตารางที่ ข.16 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน TPS-10PI-g-MA

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	ความกว้าง (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	พลังงาน (J)	Impact strength (mJ/mm <sup>2</sup> )
10% PI-g-MA	1	1	3.29	10.71	35.24	0.052	1.48
	2	2	3.87	10.41	40.29	0.047	1.17
	3	3	3.50	10.61	37.14	0.052	1.40
	4	4	3.28	10.67	35.00	0.045	1.29
	5	5	3.49	10.69	37.31	0.069	1.85
	6	6	3.35	10.53	35.28	0.054	1.53
	7	7	3.33	10.71	35.66	0.059	1.65
	8	8	3.35	10.65	35.68	0.061	1.71
	9	9	3.32	10.59	35.16	0.049	1.39
	10	10	3.37	10.68	35.99	0.056	1.56
	11	11	3.41	10.65	36.32	0.054	1.49
	12	12	3.72	10.61	39.47	0.072	1.82
	13	13	3.52	10.71	37.70	0.063	1.67
	14	14	3.72	10.57	39.32	0.076	1.93
	15	15	3.82	10.52	40.19	0.063	1.57
	16	16	3.37	10.62	35.79	0.056	1.56
	17	17	3.80	10.37	39.41	0.070	1.78
	18	19	3.39	10.83	36.71	0.052	1.42
	19	20	3.69	10.73	39.59	0.056	1.41
						<b>Mean</b>	1.56
						<b>SD</b>	0.20

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS แต่ละระบบ

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-ORB

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
0% rubber	1	1	3.14	3.20	10.05	741.44	12.72	1.80
	2	3	3.20	3.04	9.73	710.25	15.80	2.50
	3	4	3.20	3.00	9.60	731.49	17.97	2.78
	4	5	3.20	3.04	9.73	704.21	18.26	2.87
	5	7	3.20	3.00	9.60	728.65	13.86	1.95
	6	8	3.20	3.10	9.92	746.51	17.94	2.92
	7	11	3.20	3.00	9.60	690.74	19.22	3.04
	8	12	3.36	3.04	10.21	739.48	15.66	2.44
	9	14	3.14	3.20	10.05	699.56	15.77	2.50
	10	15	3.20	3.06	9.79	697.97	19.66	3.32
	11	16	3.14	3.04	9.55	735.67	15.14	2.43
	12	17	3.18	3.00	9.54	681.34	18.85	3.04
	13	19	3.20	3.02	9.66	678.95	19.31	3.05
<b>Mean</b>						714.33	16.94	2.67
<b>SD</b>						23.91	2.25	0.45

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชั้นงาน TPS-1NR

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชั้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
1% NR	1	1	3.20	2.84	9.09	697.76	8.78	1.19
	2	14	3.16	2.96	9.35	708.92	14.91	2.37
	3	15	3.14	2.76	8.67	765.31	10.28	1.44
	4	16	3.18	2.88	9.16	730.31	14.32	2.24
	5	19	3.14	2.90	9.11	623.60	11.58	1.74
	6	21	3.18	2.86	9.09	677.84	13.37	2.01
	7	3	3.20	2.80	8.96	684.44	11.01	1.66
	8	4	3.18	2.90	9.22	705.65	13.49	2.01
	9	5	3.20	2.76	8.83	697.63	9.23	1.25
	10	6	3.20	2.90	9.28	700.01	17.25	2.73
	11	2	3.20	2.90	9.28	704.77	16.00	2.55
	12	8	3.18	2.90	9.22	684.71	15.24	2.40
	13	10	3.14	2.96	9.29	640.75	11.20	1.65
	14	12	3.20	2.86	9.15	735.32	14.95	2.31
	15	13	3.20	2.82	9.02	708.13	14.51	2.16
	16	17	3.18	2.90	9.22	733.12	14.66	2.33
<b>Mean</b>						699.89	13.17	2.00
<b>SD</b>						34.69	2.51	0.47

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-3NR

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage Strain at break
3% NR	1	3	3.16	2.70	8.53	652.66	15.78	2.60
	2	17	3.20	2.70	8.64	680.57	17.49	3.08
	3	21	3.20	2.70	8.64	663.71	18.98	3.32
	4	9	3.20	2.60	8.32	599.10	17.27	3.00
	5	8	3.20	2.70	8.64	651.36	7.77	1.10
	6	19	3.20	2.90	9.28	639.90	12.53	2.04
	7	1	3.14	2.58	8.10	686.02	8.19	1.22
	8	6	3.20	2.84	9.09	731.87	10.19	1.63
	9	4	3.20	2.76	8.83	670.07	16.87	2.95
	10	20	3.20	2.60	8.32	718.36	16.65	2.74
	11	15	3.20	2.70	8.64	599.68	12.96	2.11
	12	16	3.20	2.70	8.64	595.83	17.74	3.33
	13	10	3.24	2.70	8.75	625.21	11.93	2.01
	14	7	3.20	2.70	8.64	626.75	15.12	2.71
	15	2	3.18	2.60	8.27	666.49	17.46	3.01
	16	14	3.20	2.90	9.28	572.16	12.07	2.04
	17	11	3.20	2.74	8.77	660.38	13.60	2.37
	18	12	3.18	2.84	9.03	577.95	11.73	1.89
<b>Mean</b>						645.45	14.13	2.40
<b>SD</b>						45.23	3.40	0.68

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-5NR

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
5% NR	1	21	3.20	2.64	8.45	599.26	15.27	2.98
	2	3	3.18	2.64	8.40	548.62	11.38	2.11
	3	12	3.20	2.70	8.64	652.11	12.36	2.30
	4	18	3.20	2.70	8.64	588.10	15.52	2.98
	5	11	3.20	2.68	8.58	589.29	12.39	2.08
	6	2	3.20	2.90	9.28	530.44	9.92	1.72
	7	9	3.18	2.60	8.27	654.18	9.39	1.56
	8	1	3.20	2.70	8.64	560.89	15.56	3.04
	9	4	3.16	2.60	8.22	580.53	7.93	1.18
	10	20	3.20	2.76	8.83	575.29	13.26	2.46
	11	14	3.20	2.66	8.51	560.84	15.25	2.82
	12	22	3.20	2.70	8.64	525.60	15.88	3.20
	13	5	3.20	2.60	8.32	623.10	15.90	2.88
	14	13	3.20	2.70	8.64	607.93	16.11	3.16
	15	8	3.20	2.90	9.28	627.11	9.59	1.54
	16	16	3.18	2.80	8.90	561.25	10.05	1.65
	17	17	3.20	2.88	9.22	583.94	14.85	3.01
	18	23	3.20	2.88	9.22	517.01	8.61	1.50
	19	24	3.20	2.70	8.64	496.11	9.89	1.80
<b>Mean</b>						577.98	12.58	2.31
<b>SD</b>						43.80	2.89	0.68

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชั้นงาน TPS-7NR

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชั้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
7% NR	1	21	3.18	2.70	8.59	582.09	14.18	2.90
	2	1	3.20	2.70	8.64	511.68	16.72	3.92
	3	3	3.16	2.76	8.72	586.73	13.97	3.23
	4	15	3.16	2.70	8.53	527.13	13.45	2.68
	5	2	3.20	2.66	8.51	515.86	15.28	3.22
	6	18	3.20	2.80	8.96	539.92	15.15	3.10
	7	11	3.20	2.80	8.96	599.88	9.66	1.65
	8	7	3.16	2.78	8.78	677.25	9.65	1.96
	9	4	3.18	2.82	8.97	571.19	16.75	3.40
	10	5	3.16	2.66	8.41	549.05	16.73	3.74
	11	8	3.16	2.76	8.72	546.76	17.47	3.64
	12	10	3.18	2.70	8.59	620.32	11.70	2.07
	13	12	3.20	2.90	9.28	588.94	16.60	3.30
	14	16	3.20	2.78	8.90	576.89	17.00	3.35
	15	13	3.20	2.70	8.64	554.77	13.60	2.60
	16	19	3.18	2.70	8.59	543.83	10.69	1.88
	17	20	3.20	2.76	8.83	515.31	15.85	3.25
<b>Mean</b>						565.15	14.38	2.93
<b>SD</b>						42.81	2.61	0.69

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-10NR

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
10% NR	1	21	3.14	2.7	8.48	425.08	11.17	4.71
	2	17	3.2	2.7	8.64	445.67	12.91	5.02
	3	10	3.14	2.76	8.67	514.34	12.77	4.59
	4	4	3.16	2.7	8.53	482.98	10.12	2.77
	5	9	3.2	2.8	8.96	426.73	9.92	2.56
	6	19	3.16	2.74	8.66	460.01	11.88	3.15
	7	6	3.18	2.76	8.78	462.51	7.92	2.05
	8	18	3.2	2.96	9.47	401.84	7.10	1.94
	9	3	3.2	2.8	8.96	462.20	8.81	1.88
	10	15	3.14	2.7	8.48	418.53	9.08	2.14
	11	16	3.14	2.76	8.67	505.34	10.60	2.37
	12	13	3.14	2.7	8.48	503.39	10.26	2.16
	13	2	3.2	2.7	8.64	529.13	10.76	2.42
	14	5	3.16	2.68	8.47	444.02	13.36	3.45
	15	8	3.2	2.76	8.83	530.10	8.27	1.70
	16	11	3.18	2.76	8.78	502.34	7.98	1.72
	17	14	3.18	2.7	8.59	456.81	10.87	2.45
<b>Mean</b>						468.88	10.22	2.77
<b>SD</b>						39.90	1.86	1.07

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชั้นงาน TPS-1ENR-OH

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชั้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
1% ENR-OH	1	17	3.20	3.34	10.69	442.26	11.96	3.17
	2	19	3.20	3.20	10.24	487.03	12.38	3.31
	3	20	3.18	3.26	10.37	458.90	11.36	2.94
	4	22	3.20	3.30	10.56	465.42	12.07	2.97
	5	14	3.20	3.20	10.24	485.18	13.66	3.78
	6	15	3.20	3.26	10.43	454.79	12.83	3.86
	7	13	3.24	3.20	10.37	448.11	13.74	3.71
	8	11	3.20	3.28	10.50	511.67	12.14	2.90
	9	21	3.20	3.30	10.56	417.91	12.47	3.59
	10	12	3.20	3.20	10.24	518.91	13.34	3.48
	11	2	3.18	3.14	9.99	486.60	12.46	3.15
	12	3	3.14	3.28	10.30	480.39	13.02	3.21
	13	4	3.18	3.20	10.18	447.68	13.20	3.27
	14	5	3.20	3.22	10.30	491.90	13.96	3.63
	15	6	3.20	3.20	10.24	501.97	12.19	3.00
	16	7	3.20	3.20	10.24	494.79	14.13	3.79
	17	8	3.20	3.20	10.24	499.85	13.87	3.65
	18	9	3.22	3.20	10.30	461.70	12.53	3.19
<b>Mean</b>						475.28	12.85	3.37
<b>SD</b>						27.05	0.80	0.32

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชั้นงาน TPS-3ENR-OH

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชั้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
3% ENR-OH	1	2	3.18	2.80	8.90	248.64	7.94	6.54
	2	5	3.20	2.86	9.15	285.22	8.34	6.54
	3	7	3.20	2.90	9.28	260.10	7.66	6.37
	4	8	3.18	3.10	9.86	285.63	8.78	7.44
	5	9	3.20	2.86	9.15	258.89	8.33	6.52
	6	11	3.14	2.80	8.79	297.44	8.46	5.45
	7	12	3.20	3.20	10.24	267.89	8.86	6.57
	8	13	3.20	2.90	9.28	251.16	8.27	6.05
	9	14	3.18	3.00	9.54	305.78	9.28	5.48
	10	15	3.20	3.00	9.60	244.77	8.18	6.15
	11	16	3.20	2.94	9.41	281.41	9.31	6.40
	12	17	3.20	3.00	9.60	315.48	8.56	5.49
	13	18	3.20	2.90	9.28	274.71	8.89	6.83
	14	19	3.20	3.00	9.60	252.17	8.13	5.51
	15	20	3.20	3.10	9.92	256.80	8.11	5.87
	16	21	3.20	2.96	9.47	293.75	8.47	6.82
<b>Mean</b>						273.74	8.47	6.25
<b>SD</b>						21.96	0.46	0.58

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-5ENR-OH

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
5% ENR-OH	1	1	3.18	3.24	10.30	230.29	7.87	11.70
	2	2	3.16	3.04	9.61	232.84	7.58	5.84
	3	3	3.18	3.26	10.37	255.22	8.55	9.32
	4	4	3.20	3.00	9.60	270.02	8.89	13.51
	5	5	3.16	3.40	10.74	239.14	7.58	4.98
	6	6	3.18	3.00	9.54	232.17	8.10	9.22
	7	7	3.16	3.00	9.48	275.09	8.87	9.41
	8	8	3.20	3.00	9.60	252.07	9.23	11.59
	9	9	3.20	3.20	10.24	225.19	8.48	12.66
	10	10	3.16	3.20	10.11	230.45	8.14	5.90
	11	11	3.16	3.10	9.80	229.48	7.80	8.10
	12	13	3.20	3.00	9.60	258.16	8.63	9.02
	13	14	3.20	2.98	9.54	237.76	8.35	9.22
	14	15	3.16	3.00	9.48	264.83	8.62	7.81
	15	16	3.16	3.04	9.61	271.48	8.70	9.62
	16	17	3.18	3.06	9.73	224.24	7.36	6.03
	17	18	3.20	3.10	9.92	264.02	9.18	9.26
	18	19	3.20	3.10	9.92	243.62	7.83	5.80
	19	20	3.20	3.10	9.92	231.62	7.79	6.16
	20	21	3.20	3.08	9.86	261.31	8.81	12.47
<b>Mean</b>						246.45	8.32	8.88
<b>SD</b>						17.19	0.56	2.57

ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-7ENR-OH

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
7% ENR-OH	1	1	3.20	2.60	8.32	91.98	4.56	21.64
	2	2	3.20	2.60	8.32	104.55	4.90	31.97
	3	6	3.24	2.64	8.55	113.10	4.65	20.11
	4	7	3.20	2.66	8.51	111.14	5.10	34.86
	5	5	3.20	2.58	8.26	83.26	4.60	30.10
	6	8	3.20	2.60	8.32	115.10	4.82	22.64
	7	9	3.24	2.58	8.36	115.13	4.97	23.09
	8	10	3.20	2.58	8.26	109.28	4.93	24.96
	9	11	3.26	2.62	8.54	94.54	4.61	34.67
	10	14	3.18	2.60	8.27	93.76	4.83	28.97
	11	15	3.24	2.60	8.42	115.97	4.90	31.22
	12	16	3.20	2.60	8.32	99.12	4.50	24.66
	13	17	3.22	2.54	8.18	92.49	4.72	28.68
	14	18	3.22	2.66	8.57	95.25	4.35	25.41
	15	19	3.20	2.56	8.19	100.06	4.65	29.89
	16	20	3.20	2.58	8.26	110.03	4.87	27.76
	17	21	3.20	2.58	8.26	108.90	4.98	30.94
	18	3	3.20	2.52	8.06	111.24	4.83	28.08
<b>Mean</b>						103.61	4.76	27.76
<b>SD</b>						9.94	0.20	4.32

ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-10ENR-OH

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
10% ENR-OH	1	10	3.20	2.70	8.64	34.07	2.90	45.18
	2	1	3.20	2.60	8.32	33.87	3.10	74.55
	3	3	3.20	2.56	8.19	37.35	3.07	75.33
	4	18	3.22	2.62	8.44	32.94	3.06	80.51
	5	11	3.20	2.50	8.00	32.01	2.83	78.18
	6	6	3.18	2.66	8.46	33.91	3.14	56.41
	7	14	3.20	2.50	8.00	38.07	3.13	71.60
	8	12	3.20	2.60	8.32	36.72	3.36	61.30
	9	21	3.20	2.76	8.83	49.97	3.76	57.18
	10	17	3.20	2.56	8.19	38.32	3.23	65.18
	11	8	3.20	2.66	8.51	45.63	3.72	66.99
	12	4	3.20	2.44	7.81	44.42	3.52	61.07
	13	9	3.20	2.50	8.00	47.72	3.66	48.80
	14	20	3.20	2.60	8.32	50.12	3.71	59.31
	15	2	3.20	2.56	8.19	46.48	3.62	52.22
	16	16	3.20	2.60	8.32	49.45	3.39	43.43
	17	5	3.26	2.42	7.89	54.28	3.97	50.61
	18	7	3.20	2.52	8.06	51.09	3.56	60.96
	19	13	3.24	2.52	8.16	41.42	3.46	60.09
<b>Mean</b>						41.99	3.38	61.52
<b>SD</b>						7.25	0.32	10.95

ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-PI-g-MA

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
1% PI-g-MA	1	1	3.05	2.48	7.56	728.71	14.43	2.13
	2	7	3.06	2.48	7.59	679.53	10.20	1.41
	3	8	3.05	2.45	7.47	690.66	11.42	2.09
	4	9	3.07	2.92	8.96	676.99	12.01	2.70
	5	10	3.03	2.43	7.36	675.26	18.39	3.68
	6	12	3.06	2.86	8.75	737.93	17.13	3.38
	7	13	3.05	2.55	7.78	639.61	19.09	5.01
	8	15	3.09	2.44	7.54	618.30	13.60	5.01
	9	16	3.06	2.50	7.65	611.33	10.19	2.72
	10	17	3.19	3.11	9.92	642.58	10.04	1.92
	11	18	3.06	2.46	7.53	653.40	16.78	3.11
	12	19	3.09	2.85	8.81	587.30	17.31	4.18
	13	21	3.16	2.60	8.22	650.22	15.15	3.47
	14	20	3.05	2.56	7.81	671.92	11.90	1.76
<b>Mean</b>						661.70	14.12	3.04
<b>SD</b>						42.05	3.22	1.15

ตารางที่ ค.13 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-3PI-g-MA

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
3% PI-g-MA	1	3	3.06	2.31	7.07	759.57	12.55	1.66
	2	5	3.04	2.23	6.78	651.59	12.76	1.84
	3	7	3.04	2.29	6.96	634.80	17.59	2.94
	4	8	3.04	2.33	7.08	689.63	11.94	1.57
	5	9	3.05	2.52	7.69	631.34	14.22	2.19
	6	11	3.03	2.32	7.03	652.68	12.01	1.63
	7	12	3.03	2.48	7.51	695.97	12.06	1.63
	8	15	3.06	2.34	7.16	732.53	13.90	1.98
	9	16	3.04	2.28	6.93	624.90	14.68	2.24
	10	17	3.05	2.28	6.95	668.61	14.83	2.17
	11	18	3.04	2.43	7.39	615.99	7.63	0.95
	12	19	3.03	2.33	7.06	644.41	13.70	2.03
	13	20	3.00	2.51	7.53	654.45	11.56	1.68
	14	21	2.78	2.58	7.17	680.91	13.28	1.89
	15	22	3.08	2.30	7.08	755.75	7.58	0.85
<b>Mean</b>						672.87	12.69	1.82
<b>SD</b>						45.95	2.57	0.51

ตารางที่ ค.14 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-5PI-g-MA

สูตร	ชิ้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
5% PI-g-MA	1	2	3.05	2.37	7.23	526.61	12.27	2.92
	2	3	3.05	2.69	8.20	509.80	11.25	4.12
	3	4	3.21	2.37	7.61	477.62	8.85	1.80
	4	6	3.04	2.36	7.17	528.36	11.83	2.80
	5	7	3.04	2.37	7.20	528.68	12.07	2.56
	6	9	3.05	2.31	7.05	540.68	10.56	1.87
	7	10	3.08	2.68	8.25	575.89	12.35	4.13
	8	11	3.06	2.78	8.51	522.69	7.72	2.21
	9	12	3.06	2.67	8.17	546.54	10.98	2.76
	10	13	3.04	2.33	7.08	593.59	12.93	3.64
	11	14	3.07	2.69	8.26	536.37	12.25	4.19
	12	15	3.05	2.35	7.17	508.84	12.61	2.84
	13	16	3.05	2.34	7.14	488.63	12.21	3.22
	14	17	3.03	2.33	7.06	567.57	9.76	1.70
	15	18	3.05	2.45	7.47	576.01	8.08	1.37
	16	19	3.06	2.40	7.34	541.43	15.06	4.38
	17	20	3.04	2.38	7.24	493.74	14.41	3.72
	18	21	3.05	2.69	8.20	473.54	11.46	3.30
<b>Mean</b>						529.81	11.48	2.97
<b>SD</b>						34.40	1.95	0.94

ตารางที่ ค.15 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-7PI-g-MA

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
7% PI-g-MA	1	1	3.06	3.16	9.67	458.48	7.01	1.77
	2	4	3.08	2.78	8.56	408.76	9.52	2.64
	3	5	3.06	2.76	8.45	373.65	9.88	4.05
	4	6	3.05	3.01	9.18	312.97	4.50	1.04
	5	7	3.13	3.31	10.36	330.70	5.63	2.60
	6	11	3.13	2.81	8.80	363.43	4.94	1.28
	7	12	3.15	3.06	9.64	338.76	7.54	3.70
	8	13	3.08	2.68	8.25	371.14	9.31	3.36
	9	14	3.04	2.77	8.42	353.11	8.86	2.91
	10	15	3.08	2.80	8.62	353.94	9.77	3.52
	11	17	3.11	3.06	9.52	388.51	10.12	3.60
	12	18	3.04	3.08	9.36	348.83	7.14	2.02
	13	19	3.07	3.06	9.39	342.73	8.92	3.37
	14	21	3.16	2.70	8.53	281.81	7.95	5.63
	15	22	3.16	2.70	8.53	306.86	9.52	4.67
	16	23	3.16	3.26	10.30	329.79	8.67	5.95
<b>Mean</b>						353.97	8.08	3.26
<b>SD</b>						42.04	1.80	1.40

ตารางที่ ค.16 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงาน TPS-10PI-g-MA

สูตร	ชั้นที่	หมายเลข ชิ้นงาน	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Percentage strain at break
10% PI-g-MA	1	2	3.25	2.64	8.58	180.61	4.76	2.07
	2	4	3.21	2.75	8.83	183.77	5.99	3.89
	3	7	3.04	3.20	9.73	153.89	4.00	2.09
	4	8	3.11	2.98	9.27	181.54	5.94	4.19
	5	9	3.23	2.80	9.04	186.62	5.45	3.10
	6	10	3.11	2.71	8.43	174.21	4.86	2.64
	7	11	3.10	2.74	8.49	175.43	5.72	3.20
	8	12	3.08	2.86	8.81	166.01	5.19	3.10
	9	15	3.08	2.58	7.95	166.42	4.82	2.10
	10	17	3.07	2.63	8.07	192.96	5.17	2.42
	11	18	3.13	2.82	8.83	171.30	5.43	3.49
	12	19	3.09	2.70	8.34	168.11	4.93	2.48
	13	20	3.05	2.63	8.02	169.87	5.74	3.38
<b>Mean</b>						174.67	5.23	2.93
<b>SD</b>						10.39	0.56	0.70

ภาคผนวก ง  
ผลการการศึกษาปริมาณการดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS

ผลการคำนวณร้อยละของการดูความชื้นในแต่ละวันของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติมยางต่างชนิดกัน และมีสัดส่วนแตกต่างกันภายหลังการคงความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53%

ตารางที่ ง.1 ผลการคำนวณร้อยละของการดูความชื้นในแต่ละวันของชิ้นงานทดสอบภายหลังการคงความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53%

ระบบของ TPS	ชั้นที่	% การดูความชื้น							
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7
0% rubber	1	0.0000	22.5150	29.8553	32.3197	34.3783	34.9194	34.6606	35.6311
	2	0.0000	20.5107	28.4059	27.8385	33.7599	34.3514	34.6049	35.4681
	3	0.0000	19.4569	27.7343	30.8973	33.3706	33.9796	34.6259	35.4462
	4	0.0000	19.0014	27.4874	30.6613	33.1547	33.9015	34.7326	35.5155
	5	0.0000	20.0634	27.8805	31.0488	33.3118	34.1911	35.2515	35.8658
	6	0.0000	19.8458	27.9625	31.2054	33.3716	34.3718	35.6843	36.1748
	7	0.0000	19.8603	28.3902	31.3071	33.4947	33.5498	34.8122	35.7436
	Mean		0.0000	20.1791	28.2452	30.7540	33.5488	34.1807	34.9103
SD		0.0000	1.1329	0.7840	1.3891	0.4103	0.4336	0.4068	0.2618
1% NR	1	0.0000	18.1339	26.8603	30.5102	33.0099	33.5047	34.6549	36.1971
	2	0.0000	11.1337	26.1905	30.2245	32.6733	33.2531	34.4806	35.9240
	3	0.0000	16.9080	25.7953	30.1337	32.6216	33.0858	34.3421	35.7099
	4	0.0000	17.7278	26.1778	30.3502	32.9128	33.2413	34.3715	35.6857
	5	0.0000	17.5623	26.1600	30.4267	33.1682	33.5092	34.5646	35.8196
	6	0.0000	16.9464	26.2332	30.3204	33.4096	33.6448	34.4966	35.8696
	7	0.0000	17.5144	26.2082	30.6344	33.3143	33.5175	34.1652	35.3655
	Mean		0.0000	16.5609	26.2322	30.3714	33.0157	33.3938	34.4394
SD		0.0000	2.4314	0.3151	0.1696	0.3030	0.2008	0.1614	0.2544
3% NR	1	0.0000	21.9359	27.0969	29.8498	31.3379	31.4259	32.1902	33.5498
	2	0.0000	18.6411	25.7515	28.6720	30.7308	30.9413	31.8819	33.0264
	3	0.0000	17.3899	24.8270	28.0411	30.2141	30.5956	31.7532	32.8656
	4	0.0000	16.9375	24.6865	27.8986	29.9271	30.5157	31.7315	32.9345
	5	0.0000	16.4801	24.3342	27.7821	29.8791	30.6317	31.8603	33.0503
	6	0.0000	16.9113	25.1025	28.3089	30.0939	30.9599	32.2161	33.4788
	7	0.0000	17.1967	25.9837	28.7480	30.5041	30.9659	32.0065	33.6585
	Mean		0.0000	17.9275	25.3975	28.4715	30.3838	30.8623	31.9485
SD		0.0000	1.8933	0.9492	0.7108	0.5198	0.3132	0.1961	0.3270

ตารางที่ ง.1 ผลการคำนวณร้อยละของการดูความชื้นในแต่ละวันของชิ้นงานทดสอบภายหลัง  
การคงความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% (ต่อ)

ระบบของ TPS	ชั้นที่	% การดูความชื้น							
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7
5% NR	1	0.0000	15.4825	24.1269	27.1261	29.3855	30.2186	31.4316	32.8579
	2	0.0000	13.9408	22.9672	26.5552	28.9561	29.8514	31.0386	32.6900
	3	0.0000	13.2660	22.0717	26.2509	28.7942	29.7144	30.8838	32.3407
	4	0.0000	13.8975	22.4882	26.7633	28.9211	29.6763	30.9912	32.4410
	5	0.0000	14.3661	23.1280	27.2142	29.2607	29.8435	31.2733	32.6489
	6	0.0000	14.7488	23.5741	27.6699	29.6311	30.2048	31.5256	33.0065
	7	0.0000	15.5864	23.9968	27.2476	29.5137	30.5389	31.0852	32.4880
<b>Mean</b>		0.0000	14.4698	23.1933	26.9753	29.2089	30.0068	31.1756	32.6390
<b>SD</b>		0.0000	0.8581	0.7608	0.4800	0.3224	0.3196	0.2393	0.2369
7% NR	1	0.0000	18.1237	25.2874	28.0359	29.0428	29.6959	31.1586	31.7505
	2	0.0000	16.0560	24.1860	27.2315	28.5141	29.1456	30.8623	31.3820
	3	0.0000	15.4058	23.4228	26.5641	28.0825	28.7696	30.5890	31.1780
	4	0.0000	14.6626	24.6068	26.3465	28.0734	28.7796	30.5836	31.4438
	5	0.0000	18.5659	23.4078	26.5063	28.0333	28.6505	30.5211	31.6409
	6	0.0000	17.7155	23.8011	26.8030	28.3386	28.9679	30.9251	32.1901
	7	0.0000	17.2444	23.3481	26.5889	28.2723	28.7958	30.5322	31.5329
<b>Mean</b>		0.0000	16.8248	24.0086	26.8680	28.3367	28.9721	30.7388	31.5883
<b>SD</b>		0.0000	1.4701	0.7312	0.5878	0.3559	0.3574	0.2459	0.3230
10% NR	1	0.0000	13.2601	21.5788	25.0910	26.8033	27.6594	29.5807	30.4301
	2	0.0000	12.2167	20.2201	24.3618	26.5043	27.4095	29.2589	30.1576
	3	0.0000	11.8484	19.8390	24.1261	26.4341	27.3801	29.1110	29.9228
	4	0.0000	12.3381	20.0294	24.2289	26.4989	27.4469	29.2429	29.9239
	5	0.0000	12.5706	20.1063	24.2878	26.4671	27.3008	29.2504	29.8674
	6	0.0000	13.4040	20.8621	24.8110	26.8532	27.5771	29.7744	30.2915
	7	0.0000	13.9135	21.8115	25.2694	27.0427	27.7452	29.4503	30.2005
<b>Mean</b>		0.0000	12.7930	20.6353	24.5966	26.6577	27.5027	29.3812	30.1134
<b>SD</b>		0.0000	0.7447	0.7936	0.4565	0.2390	0.1615	0.2322	0.2138

ตารางที่ ง.1 ผลการคำนวณร้อยละของการดูดความชื้นในแต่ละวันของชิ้นงานทดสอบภายหลังการคงความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% (ต่อ)

ระบบของ TPS	ชั้นที่	% การดูดความชื้น							
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7
<b>1% ENR-OH</b>	1	0.0000	19.5153	26.2738	29.5574	31.0582	31.5266	31.4358	33.1852
	2	0.0000	16.8086	24.4872	28.3288	30.2747	31.0119	30.9295	32.7564
	3	0.0000	15.5669	23.3289	27.5532	29.8179	30.6141	30.5187	32.4211
	4	0.0000	14.9920	22.7807	27.2943	29.7712	30.5404	30.5113	32.2626
	5	0.0000	14.4024	22.7239	27.2247	29.8077	30.7568	30.6052	32.3419
	6	0.0000	14.7753	23.0271	27.0045	29.7454	30.8213	30.4123	32.5057
	7	0.0000	14.7919	23.7998	27.2782	29.5089	30.8364	30.9262	32.7977
<b>Mean</b>		0.0000	15.8361	23.7745	27.7487	29.9977	30.8725	30.7627	32.6101
<b>SD</b>		0.0000	1.8046	1.2651	0.9039	0.5202	0.3270	0.3601	0.3232
<b>3% ENR-OH</b>	1	0.0000	13.3722	23.5828	27.2601	29.9298	28.5400	30.8563	32.7093
	2	0.0000	12.0828	22.1198	25.9634	27.9182	28.1612	30.0603	31.8377
	3	0.0000	11.8039	21.7007	25.8659	27.2494	28.0646	29.9965	31.7753
	4	0.0000	12.0432	21.7644	25.8793	27.6035	28.0055	29.8355	31.6549
	5	0.0000	12.3154	22.1230	26.0812	27.9088	28.2329	29.9862	31.9307
	6	0.0000	12.7189	22.6370	26.5624	27.7138	28.4689	30.2629	32.4801
	7	0.0000	13.1780	22.7508	27.1040	29.0626	27.2708	29.8590	31.8554
<b>Mean</b>		0.0000	12.5021	22.3826	26.3880	28.1980	28.1063	30.1224	32.0348
<b>SD</b>		0.0000	0.6013	0.6613	0.5929	0.9484	0.4181	0.3531	0.3972
<b>5% ENR-OH</b>	1	0.0000	16.1912	22.4698	25.5913	26.7993	27.2713	28.4895	30.0274
	2	0.0000	14.7420	21.1934	24.6222	26.2949	26.5248	28.0020	29.4449
	3	0.0000	13.6707	20.2652	23.8852	25.9013	26.0602	27.7634	29.1638
	4	0.0000	13.5029	20.0311	23.6222	25.7810	25.9886	27.6596	29.1541
	5	0.0000	13.1194	19.9418	23.7230	25.9121	26.2183	27.8359	29.2698
	6	0.0000	12.6011	19.8111	23.6698	25.9860	26.3227	27.8450	29.2067
	7	0.0000	12.7386	20.4087	23.9821	26.2646	26.5387	28.0090	29.4294
<b>Mean</b>		0.0000	13.7951	20.5887	24.1565	26.1342	26.4178	27.9435	29.3851
<b>SD</b>		0.0000	1.2739	0.9465	0.7176	0.3501	0.4312	0.2708	0.3070

ตารางที่ ง.1 ผลการคำนวณร้อยละของการดูดความชื้นในแต่ละวันของชิ้นงานทดสอบภายหลังการคงความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% (ต่อ)

ระบบของ TPS	ชั้นที่	% การดูดความชื้น							
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7
7% ENR-OH	1	0.0000	13.3457	21.7352	24.9157	26.6240	27.2027	28.6019	30.1472
	2	0.0000	11.9856	20.5424	23.9474	25.6173	26.3812	27.7788	29.4132
	3	0.0000	11.5878	20.0924	23.4931	25.4157	26.2875	27.6097	29.1917
	4	0.0000	11.9810	20.3672	23.4587	25.3065	26.2659	27.5807	29.2212
	5	0.0000	12.6948	20.6327	23.6405	25.3897	26.6540	27.7162	29.3095
	6	0.0000	12.7065	20.5259	23.7782	25.4596	26.7978	27.6821	29.6719
	7	0.0000	14.8078	21.6922	24.3018	25.8192	26.4096	27.8444	29.7810
<b>Mean</b>		0.0000	12.7299	20.7983	23.9336	25.6617	26.5713	27.8305	29.5337
<b>SD</b>		0.0000	1.0892	0.6491	0.5212	0.4572	0.3398	0.3522	0.3502
10% ENR-OH	1	0.0000	15.9002	22.2720	24.1207	24.6497	24.2544	27.0682	29.0041
	2	0.0000	15.5851	21.4608	23.3588	24.2107	23.9163	26.6850	28.6645
	3	0.0000	14.5170	20.7511	22.8810	23.8588	23.7716	26.4869	28.2369
	4	0.0000	14.4078	20.6802	22.9761	24.2295	24.1782	26.7248	28.3655
	5	0.0000	13.3839	20.2489	22.5008	23.9272	23.7936	26.4340	28.1275
	6	0.0000	13.4251	20.4754	22.6838	24.1727	23.9850	26.6250	28.5080
	7	0.0000	13.7891	21.1978	23.2954	24.6626	24.6684	27.0815	29.6582
<b>Mean</b>		0.0000	14.4297	21.0123	23.1166	24.2444	24.0811	26.7293	28.6521
<b>SD</b>		0.0000	1.0016	0.6918	0.5386	0.3149	0.3160	0.2575	0.5302

ตารางที่ ง.1 ผลการคำนวณร้อยละของการดูดความชื้นในแต่ละวันของชิ้นงานทดสอบภายหลังจากการคงความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% (ต่อ)

ระบบของ TPS	ชั้นที่	% การดูดความชื้น							
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7
1% PI-g-MA	1	0.0000	20.9280	28.7273	33.8759	34.1472	35.7522	36.3400	36.1083
	2	0.0000	17.9751	27.3135	32.4839	33.9295	35.4332	36.2140	36.4672
	3	0.0000	16.5517	25.9511	31.6019	33.7273	35.3099	36.1875	36.4310
	4	0.0000	16.0688	25.5789	31.3972	33.8120	35.4666	36.3261	36.4404
	5	0.0000	17.7567	26.6643	31.9013	34.2510	35.7473	36.5480	36.7818
	6	0.0000	17.5827	26.9519	32.1382	34.6017	35.9209	36.7383	36.8623
	7	0.0000	18.3995	27.9536	33.0320	34.9685	36.4418	36.8324	36.5199
<b>Mean</b>		0.0000	17.8946	27.0201	32.3472	34.2053	35.7245	36.4552	36.5158
<b>SD</b>		0.0000	1.5661	1.0972	0.8684	0.4480	0.3824	0.2552	0.2490
3% PI-g-MA	1	0.0000	17.3937	25.9075	31.0766	33.0934	34.8309	36.6305	36.9345
	2	0.0000	16.6625	25.0282	30.1807	32.5217	34.1659	35.5027	35.8102
	3	0.0000	16.5481	24.5522	29.8310	32.3402	33.9665	35.4720	35.9484
	4	0.0000	15.8799	24.1426	29.7163	32.3995	34.0105	35.7223	36.2139
	5	0.0000	16.6352	24.7673	30.3205	32.8873	34.4565	36.3177	36.7131
	6	0.0000	17.4882	25.2890	31.0570	33.4964	34.8685	36.8123	37.1363
	7	0.0000	17.6835	25.9181	32.2193	33.3805	34.7657	36.3336	36.7757
<b>Mean</b>		0.0000	16.8987	25.0864	30.6288	32.8741	34.4378	36.1130	36.5046
<b>SD</b>		0.0000	0.6448	0.6694	0.8830	0.4702	0.3930	0.5452	0.5127
5% PI-g-MA	1	0.0000	18.9556	26.0489	31.6209	32.3513	33.5647	34.6091	34.6212
	2	0.0000	17.7583	25.7242	31.2740	31.7675	33.3248	34.2925	34.8500
	3	0.0000	16.2219	24.4509	30.1688	31.3669	32.7041	33.9747	34.1744
	4	0.0000	15.9260	24.2193	30.0024	31.3476	32.5667	33.9419	34.1881
	5	0.0000	15.8998	24.1730	29.9291	31.1845	32.3834	33.8146	34.3356
	6	0.0000	14.6224	23.5131	29.6819	31.2752	32.4647	33.9530	33.9751
	7	0.0000	16.3599	24.7647	30.5138	31.6228	32.7019	34.0207	34.0747
<b>Mean</b>		0.0000	16.5349	24.6992	30.4558	31.5594	32.8158	34.0866	34.3170
<b>SD</b>		0.0000	1.4093	0.8993	0.7297	0.4037	0.4505	0.2724	0.3135

ตารางที่ ง.1 ผลการคำนวณร้อยละของการดูดความชื้นในแต่ละวันของชิ้นงานทดสอบภายหลังการคงความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% (ต่อ)

ระบบของ TPS	ชั้นที่	% การดูดความชื้น							
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7
7% PI-g-MA	1	0.0000	14.6506	23.7373	28.8745	30.6965	32.5185	33.3602	33.5909
	2	0.0000	12.2509	20.4538	27.1343	29.8589	31.9824	33.0683	33.0295
	3	0.0000	12.2718	20.2963	26.4513	29.1790	31.3764	32.5681	32.6938
	4	0.0000	12.2467	20.2065	26.3189	29.2258	31.4914	32.8443	33.0399
	5	0.0000	11.7827	19.4446	25.7628	28.9298	31.2273	32.7607	33.0558
	6	0.0000	11.9159	19.5987	26.1401	29.3136	31.6016	33.1269	33.5261
	7	0.0000	14.0487	22.0890	28.2080	30.4087	32.6153	34.0417	34.1232
<b>Mean</b>		0.0000	12.7382	20.8323	26.9843	29.6589	31.8304	33.1100	33.2942
<b>SD</b>		0.0000	1.1299	1.5432	1.1565	0.6767	0.5552	0.4863	0.4798
10% PI-g-MA	1	0.0000	12.9534	20.6218	26.8394	28.6208	31.6506	31.4779	31.4927
	2	0.0000	13.1129	20.6002	26.6487	28.3399	30.2601	31.3759	31.5462
	3	0.0000	11.7979	18.9407	25.5694	27.7034	29.6992	31.0150	31.3025
	4	0.0000	11.1275	18.0057	24.7361	27.3860	29.4500	30.8963	31.2817
	5	0.0000	12.1063	19.2521	25.2702	27.7534	29.7049	31.1598	31.5045
	6	0.0000	11.8058	18.9328	25.4697	27.9644	30.1227	31.4580	31.8048
	7	0.0000	12.9848	20.3558	27.2480	28.6896	29.9461	31.8718	32.0731
<b>Mean</b>		0.0000	12.2698	19.5299	25.9688	28.0654	30.1191	31.3221	31.5722
<b>SD</b>		0.0000	0.7593	1.0103	0.9374	0.4956	0.7293	0.3291	0.2810

- วิธีการคำนวณหาร้อยละของการดูดความชื้น

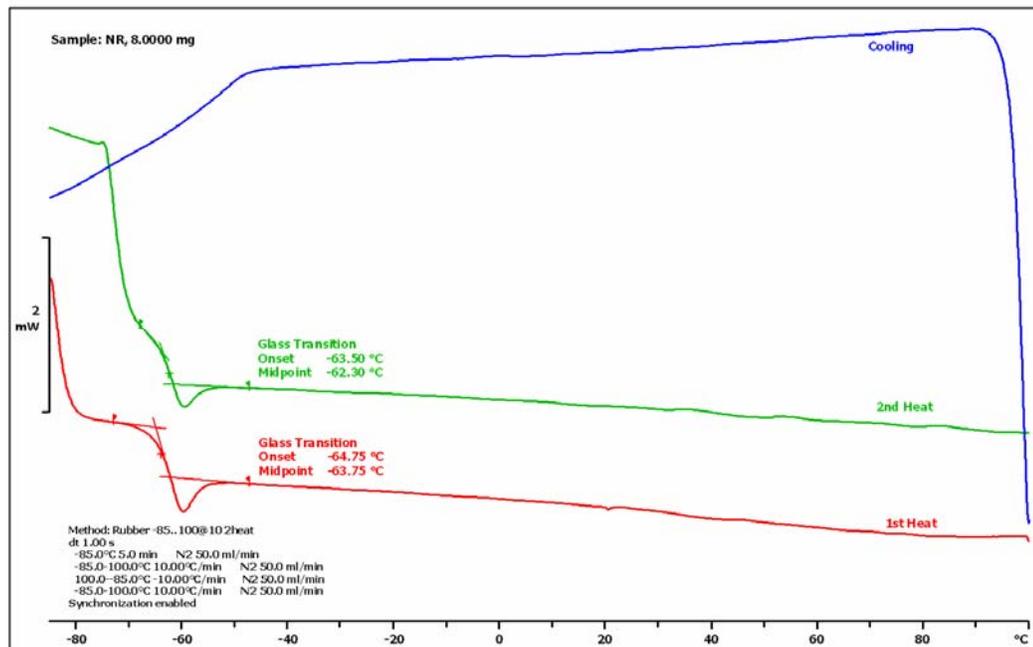
$$\% \text{ การดูดความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักวันใด ๆ} - \text{น้ำหนักวันที่ศูนย์}}{\text{น้ำหนักวันที่ศูนย์}} \times 100$$

เช่น ชิ้นงาน 10% PI-g-MA ชั้นที่ 7 วันที่ 7

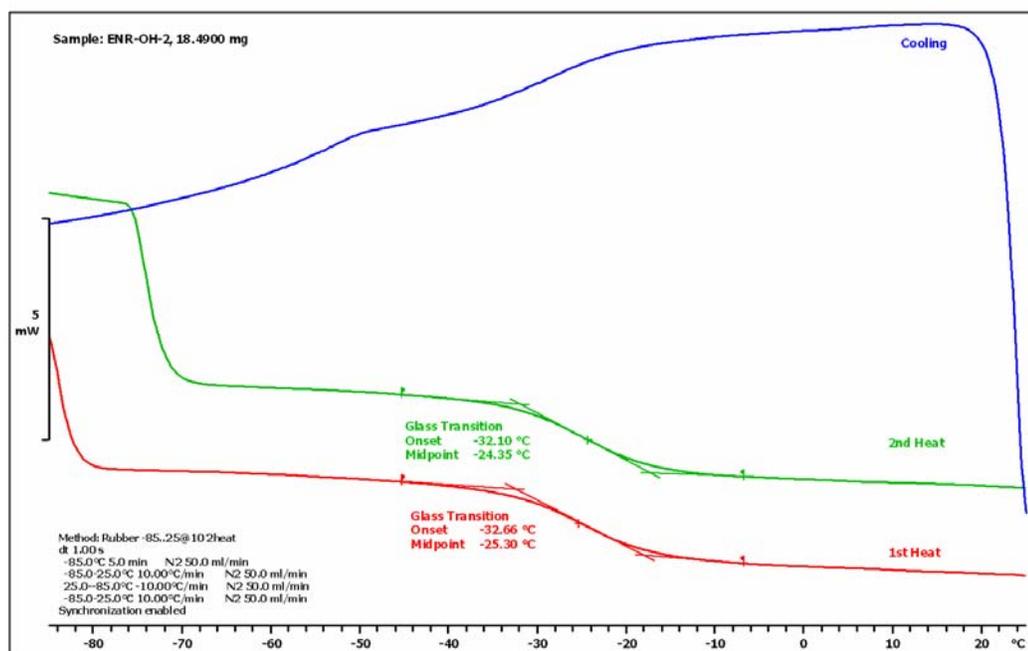
$$\begin{aligned} \% \text{ การดูดความชื้น} &= \frac{(2.4279 - 1.8383)}{1.8383} \times 100 \\ &= 32.0731 \end{aligned}$$

ภาคผนวก จ

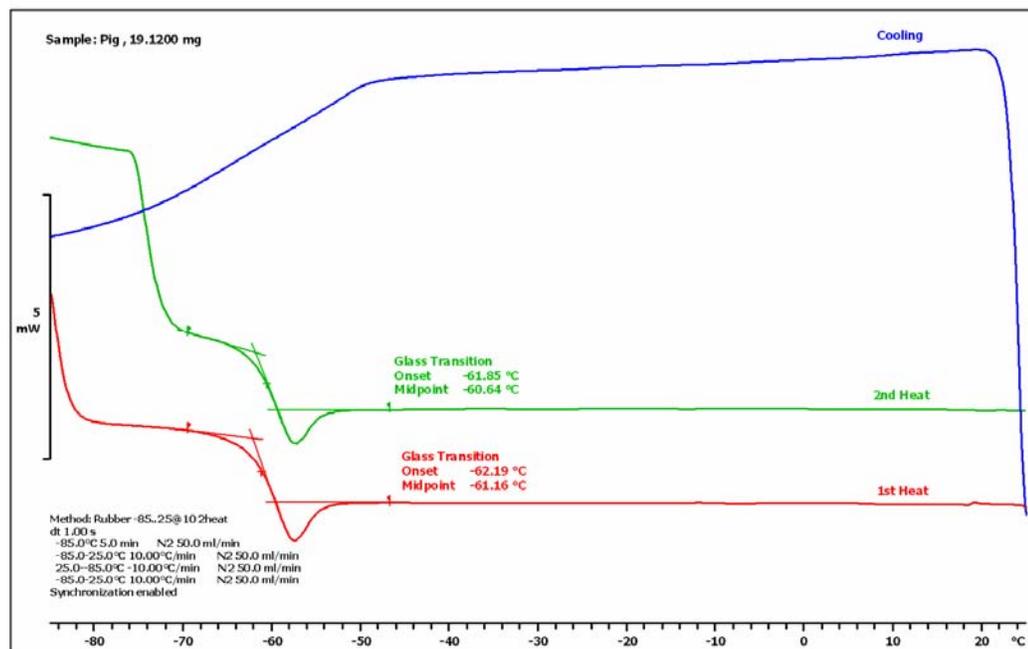
DSC thermogram ของยางแต่ละชนิด



รูปที่ จ.1 DSC thermogram ของธรรมชาติ (natural rubber, NR)



รูปที่ จ.2 DSC thermogram ของ hydroxylated epoxidized natural rubber (ENR-OH)



รูปที่ ๓.3 DSC thermogram ของ polyisoprene-*graft*-maleic anhydride (PI-g-MA)

ภาคผนวก ฉ

สถานะของการผสม master batch ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

**ตารางที่ ๑.1** พื้นที่ใต้พีค ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการเชื่อมขวาง (ระหว่างหมู่ -OH ของแป้งกับส่วนของ maleic anhydride ของ PI-g-MA) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

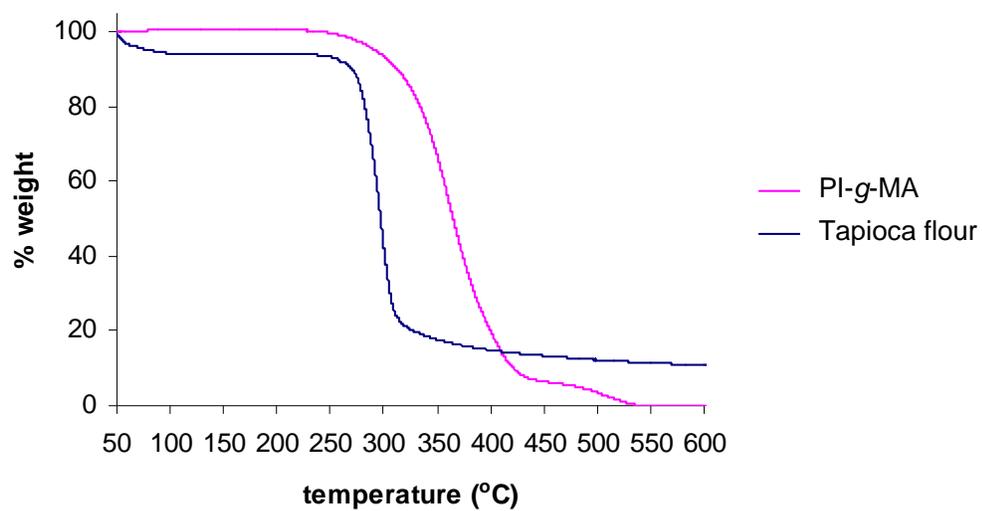
อุณหภูมิ ใน การผสม (°C)	peak	peak	peak	peak	peak
	maleic anhydride 1 (a)	maleic anhydride 2 (b)	carbonyl (c)	ester (d)	-CH <sub>2</sub> , -CH <sub>3</sub> (x)
	1871-1841 cm <sup>-1</sup>	1804-1761 cm <sup>-1</sup>	1719-1694 cm <sup>-1</sup>	1749-1719 cm <sup>-1</sup>	3017-2749 cm <sup>-1</sup>
	area of a	area of b	area of c	area of d	area of x
before blend	0.984	1.464	0.959	0.000	19.424
160	0.859	1.438	0.820	0.000	20.481
170	1.070	1.423	0.848	0.000	21.361
185	0.755	1.274	0.613	0.000	19.885
200	0.843	1.379	0.599	0.000	20.172
220	0.800	1.241	0.534	0.000	12.822
225	0.561	1.066	0.605	0.711	17.500

**ตารางที่ ๑.2** อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้พีคที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการเชื่อมขวาง (ระหว่างหมู่ -OH ของแป้งกับส่วนของ maleic anhydride ของ PI-g-MA) ต่อพื้นที่ใต้พีคของ ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (-CH<sub>2</sub>, -CH<sub>3</sub>) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ ใน การผสม (°C)	peak	peak	peak	peak
	maleic anhydride 1 (a)	maleic anhydride 2 (b)	carbonyl (c)	ester (d)
	1871-1841 cm <sup>-1</sup>	1804-1761 cm <sup>-1</sup>	1719-1694 cm <sup>-1</sup>	1749-1719 cm <sup>-1</sup>
	ratio of area a/x	ratio of area b/x	ratio of area c/x	ratio of area d/x
before blend	0.051	0.075	0.975	0.000
160	0.042	0.070	0.955	0.000
170	0.050	0.067	0.793	0.000
185	0.038	0.064	0.812	0.000
200	0.042	0.068	0.711	0.000
220	0.062	0.097	0.668	0.000
225	0.032	0.061	1.078	0.041

ภาคผนวก ข

TGA thermogram ของแป้งมันสำปะหลังและ polyisoprene-*graft*-maleic anhydride (PI-*g*-MA)



รูปที่ ๑.๑ TGA thermogram แป้งมันสำปะหลังและ polyisoprene-*graft*-maleic anhydride (PI-g-MA) ภายใต้บรรยากาศของก๊าซออกซิเจน

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล ที่อยู่	นายภูวนันท์ วศุตม์ชานนทน์ 18 ซอย นานุม 6 ถ. นาสรางข้างประปา ต. นครปฐม อ. เมือง จ. นครปฐม 73000
โทรศัพท์	(034) 267-304 (085) 184-2910
E-mail address	pu_wasutchanon@hotmail.com
<b>ประวัติการศึกษา</b>	
พ.ศ. 2544	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย โรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย
พ.ศ. 2548	สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์ สาขาปิโตรเคมีและวัสดุ พอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
พ.ศ. 2549	ศึกษาต่อระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาการและ วิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
<b>ประวัติการทำงาน</b>	
พ.ศ. 2549-2550	ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม ตำแหน่งผู้ช่วยอาจารย์ (teacher assistant)