



การเตรียมและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เตรียมจาก
พอลิเอสเทอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพผสมยางธรรมชาติ
**Preparation and Properties of Thermoplastic Elastomer made from
Biodegradable Polyester Blended with Natural Rubber**

นุดา พิสุทธิ์ธีเรียร
Nuda Phisuttian

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Polymer Science and Technology
Prince of Songkla University**

2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เตรียมจาก
พอลิเอสเทอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพผสมยางธรรมชาติ
ผู้เขียน นางสาวนุศดา พิสุทธิธีร
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ตันรัตนกุล)ประธาน (ดร.ชวนพิศ ขาวคง)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ตันรัตนกุล)
..... (ดร.ภาสรี เล้ากิจเจริญ)กรรมการ (ดร.ภาสรี เล้ากิจเจริญ)
กรรมการ (ดร.จุรีรัตน์ ประसार)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกโกลิเอสเตอร์เตรียมจากพอลิเอสเตอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพผสมยางธรรมชาติ
ผู้เขียน	นางสาวนุศดา พิสุทธิธีร
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรพทาเลต (polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) กับยางธรรมชาติ สมบัติที่ศึกษามีทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน ได้แก่ สมบัติการทนต่อแรงดึง สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง การกระเด็งตัว การยืดถาวร ลักษณะสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) และสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี (differential scanning calorimetry, DSC) การศึกษาแบ่งเป็นสามส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาอิทธิพลของเครื่องมือที่ใช้ในการผสม ประกอบด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และเครื่องผสมแบบปิด ทำการศึกษาที่ปริมาณยางธรรมชาติ 20 wt% และ 50 wt% พบว่าการเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติความทนต่อแรงดึงและมีความเข้ากันได้ดีกว่าเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวและเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาอิทธิพลของชนิดยาง โดยยางที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยยางธรรมชาติ ยาง ENR25 และยาง ENR50 และศึกษาที่ปริมาณยาง 5 – 50 wt% พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาดและสมบัติทางกายภาพน้อยกว่า PBAT พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยาง 10 wt% มีสมบัติเชิงกลดีกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% และสมบัติเชิงกลลดลง เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดของยาง พบว่า PBAT ผสมยาง ENR25 มีสมบัติการทนต่อแรงดึงสูงที่สุด และยางวัลคาไนซ์ให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพเช่นเดียวกันกับยางไม่วัลคาไนซ์ ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลมีความสอดคล้องกับภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและ DSC ส่วนที่สามเป็นการศึกษาฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่า การเติมยางธรรมชาติช่วยให้สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ง่ายและป้องกันการติดกันเองของฟิล์มในขณะม้วนเก็บ และยังเป็น การลดต้นทุนในการผลิตฟิล์ม PBAT สำหรับผลิตเป็นฟิล์มคลุมดิน โดยสามารถเติมยางธรรมชาติได้ 10 wt% และเมื่อศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มพบว่า ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสามารถย่อยสลายได้เร็วกว่าฟิล์ม PBAT บริสุทธิ์ ส่วนพอลิเมอร์ผสมที่มียาง ENR25 และ ENR50 ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปได้ เพราะยาง

เกิดการรวมตัวกันอีกครั้งหนึ่งในระหว่างการหลอมในเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว กลายเป็นเม็ดยาง
ขนาดใหญ่ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา

Thesis Title Preparation and Properties of Thermoplastic Elastomer made from Biodegradable Polyester Blended with Natural Rubber

Author Miss Nuda Phisuttian

Major Program Polymer Science and Technology

Academic Year 2011

ABSTRACT

Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) is a new biodegradable polyester. PBAT is classified as the elastomer due to high ductility. It is interesting to blend PBAT with natural rubber (NR) or epoxidized natural rubber (ENR) in order to reduce cost of the products because of high price of PBAT. PBAT was blended with NR or ENR. The rubber content was 5-50 wt%. The blends were prepared by using different processing methods: a single screw extruder, a twin screw extruder and an internal mixer. It was found that blending by the internal mixer showed the highest tensile properties and miscibility than blending by single screw extrusion and the twin screw extrusion. Tensile properties, tear strength and physical properties of the blends were lower than virgin PBAT. At 10 wt% of rubber, Mechanical properties were higher than 5 wt% of rubber. Mechanical properties decreased with increasing rubber content. Tensile properties of PBAT/ENR25 blends were higher than PBAT/NR blends and PBAT/ENR50 blends. The same trend appeared in the properties in the vulcanized rubber. The morphology of the blends was studied using scanning electron microscope (SEM). The micrographs indicate a two-phase system where the 5-30 wt% of rubber was found to disperse in the continuous phase. A co-continuous phase morphology was observed for 50 wt% of rubber. The blown film thickness was ~0.06 mm, in the range of a commercial PE blown film. The addition of 5-10 wt% NR increased modulus, strain at break and tear strength and, then, the properties decreased when added 15 wt% NR. The addition of NR slightly lowered stress at yield and stress at break of PBAT. The same trend appeared in the properties in the TD. The results indicated the advantages of NR in the blends. The addition of NR in PBAT provided improvement in tensile properties and tear resistance. NR increased modulus, elongation at break and tear strength of the blends. The optimal NR content was

5-10 wt%. Vulcanization in NR slightly changed tensile properties and tear resistance of the blends. Another usefulness of NR in the blends was acting as an antiblock agent. Biodegradation in soil of all blends, the blends were degradable faster than virgins PBAT.

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการรูป	(17)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(22)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	4
2.2 อะลิฟาติก-อะโรมาติก โคพอลิเอสเทอร์	11
2.3 ยางธรรมชาติ	14
2.4 ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไธซ์	21
2.5 พอลิเมอร์ผสม	24
2.6 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	28
2.7 การตรวจสอบเอกสาร	35
3. วิธีการวิจัย	50
3.1 สารเคมี	50
3.2 อุปกรณ์	51
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	51
3.4 วิธีดำเนินการทดลอง	52
3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT ผสมกับยางธรรมชาติ	52
3.4.2 การเตรียมชิ้นทดสอบโดยใช้กระบวนการอัด	53
3.4.3 การขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูป	54
3.4.4 การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง	55
3.4.5 การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์ม	55
3.4.6 การทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการฉีกขาด	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.7 การทดสอบความแข็ง	56
3.4.8 การทดสอบการกระเดื่องตัว	57
3.4.9 การทดสอบสมบัติการยืดถาวร	57
3.4.10 การทดสอบการเสื่อมสลายโดยการฝังดิน	57
3.4.11 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียล-สแกนนิ่งคัลลอริเมตรี	58
3.4.12 การตรวจสอบความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม	58
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	60
4.1 อิทธิพลของเครื่องมือที่ใช้ในการผสม	60
4.2 อิทธิพลของปริมาณยาง	68
4.2.1 ยางไมวัลคาไนซ์	68
4.2.1.1 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ	68
4.2.1.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25	73
4.2.1.3 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR50	78
4.2.1.4 การเปรียบเทียบชนิดยาง	82
4.2.2 ยางวัลคาไนซ์	93
4.2.2.1 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์	93
4.2.2.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 วัลคาไนซ์	97
4.2.2.3 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR50 วัลคาไนซ์	101
4.2.2.4 การเปรียบเทียบชนิดยางวัลคาไนซ์	106
4.3 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม	113
4.3.1 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT ผสมยางธรรมชาติ	114
4.3.2 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์	117
4.4 ผลการทดสอบความสามารถในการย่อยสลาย	124
4.4.1 ฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ	124
4.4.2 ฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์	132
5 สรุปผลผลการทดลอง	142
5.1 อิทธิพลของเครื่องมือที่ใช้ในการผสม	142
5.2 อิทธิพลของชนิดยาง	142

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.1 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ	142
5.2.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25	142
5.2.3 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR50	143
5.2.4 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์	143
5.2.5 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 วัลคาไนซ์	144
5.2.6 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR50 วัลคาไนซ์	144
5.3 สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนและหลังฝังดิน	144
5.3.1 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT ผสมยางธรรมชาติ	145
5.3.2 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์	145
5.4 ข้อเสนอแนะ	146
บรรณานุกรม	147
ภาคผนวก	156
ก. DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม	157
ข. เอกสารการเผยแพร่ผลงาน	160
ประวัติผู้เขียน	168

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 โครงสร้างทางเคมีและอุณหภูมิหลอมของของอะลifatikพอลิเอสเตอร์ พอลิ-คาร์บอเนต พอลิยูรีเทนและพอลิเอไมด์	11
2.2 สมบัติทางกายภาพของ PBAT และ LDPE	13
2.3 สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม LDPE	14
2.4 ประเภทของยางแท่งตามมาตรฐาน ISO 2000	17
2.5 มาตรฐานยางแท่งของประเทศไทย	18
3.1 สูตรยางคอมปาวด์	54
3.2 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยยางวัลคาไนซ์	54
4.1 การเรียกชื่อสูตรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ	60
4.2 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยางธรรมชาติ 20 wt% ที่ผสมด้วยเครื่องผสมต่างชนิดกัน	62
4.3 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยางธรรมชาติ 50 wt% ที่ผสมด้วยเครื่องผสมต่างชนิดกัน	65
4.4 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติ 20 wt% และ 50 wt% ที่ผสมด้วยเครื่องผสมต่างชนิดกัน	67
4.5 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	70
4.6 ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 50 wt%	70
4.7 ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยางธรรมชาติใน PBAT ผสมยางธรรมชาติ	71
4.8 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	72
4.9 สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	73
4.10 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	75
4.11 ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง ENR25 0 – 30 wt%	75

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.12 ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยางธรรมชาติใน PBAT ยาง ENR25	ผสม 77
4.13 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	77
4.14 สมบัติกายภาพของ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	78
4.15 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	80
4.16 ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	81
4.17 ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยางธรรมชาติใน PBAT ยาง ENR50	ผสม 81
4.18 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	82
4.19 สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	82
4.20 มอดุลัสของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	83
4.21 ความเค้น ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	84
4.22 ความเครียด ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	85
4.23 ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยางแต่ละชนิดที่มีปริมาณยาง 5 wt% 10 wt% และ 30 wt%	86
4.24 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	89
4.25 ความแข็งของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	90
4.26 การกระแต้ตัวของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	91
4.27 การยืดถาวรของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	92
4.28 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	94
4.29 ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 30 wt%	94
4.30 ความเค้น ณ จุดขาดและความเครียด ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติ และ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	95

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.31 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	95
4.32 สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	96
4.33 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	98
4.34 ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	99
4.35 ความเค้น ณ จุดขาดและความเครียด ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยาง ENR25 และ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์	99
4.36 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR25 และ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	100
4.37 สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยาง ENR25 และ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	101
4.38 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง ENR50 วัลคาไนซ์ 0 – 50 wt%	103
4.39 ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	103
4.40 ความทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยาง ENR50 และ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง ENR50 วัลคาไนซ์ 0 – 100 wt%	103
4.41 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR50 และ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	104
4.42 สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยาง ENR50 และ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	105
4.43 มอดุลัสของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	107
4.44 ความเค้น ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	108
4.45 ความเครียด ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	109

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.46 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	110
4.47 ความแข็งแรงของ PBAT ผสมยางยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	111
4.48 การกระเด็นตัวของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	112
4.49 การยึดถาวรของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	113
4.50 สมบัติความทนต่อแรงดึงและความหนาของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt% ทดสอบตามแนวเครื่องจักร	116
4.51 สมบัติความทนต่อแรงดึงและความหนาของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt% ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	117
4.52 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt%	117
4.53 สมบัติความทนต่อแรงดึงและความหนาของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt% ทดสอบตามแนวเครื่องจักร	118
4.54 สมบัติความทนต่อแรงดึงและความหนาของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt% ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	120
4.55 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร	120
4.56 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	121
4.57 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์	121
4.58 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ทดสอบตามแนวเครื่องจักร	122
4.59 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติและยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	123
4.60 มอดูลัสของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%	125

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า	
4.61	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า E ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจาก ฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%	125
4.62	ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็น ระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%	126
4.63	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า σ_b ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจาก ฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%	127
4.64	ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็น ระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%	128
4.65	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า ϵ_b ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจาก ฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%	128
4.66	มอดุลัสของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์หลังจากฝังดินเป็น ระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 0 – 20 wt%	133
4.67	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า E ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจาก ฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%	134
4.68	ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์หลังจากฝังดิน เป็นระยะเวลา 6 เดือนที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 0 – 20wt%	135
4.69	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า σ_b ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจาก ฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%	135
4.70	ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์หลังจากฝัง ดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วัน ที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 0 – 20 wt%	136
4.71	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า ϵ_b ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจาก ฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%	137

รายการรูป

รูป		หน้า
2.1	กลไกการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	7
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหลอมเหลวและความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิเอสเทอร์ด้วยเอนไซม์ <i>R. arrhizus</i>	10
2.3	โครงสร้างทางเคมีของ PBAT	12
2.4	โครงสร้างทางเคมีของพอลิไอโซพรีน	15
2.5	mooney scorch โดยปกติที่อุณหภูมิ 121°C และ 135°C	20
2.6	ความอ่อนตัว (mooney plasticity) และการผ่อนคลายความเค้น (stress relaxation)	20
2.7	สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์	22
2.8	การเกิดปฏิกิริยาของกรดฟอร์มิกเปอร์ออกไซด์	23
2.9	กลไกการเกิดปฏิกิริยาอีพ็อกซีเดชันของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์	23
2.10	สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ	25
2.11	ฐานฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ประกอบด้วยส่วนที่แข็งและส่วนที่นิ่ม	28
2.12	โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์	29
2.13	โครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอไมด์อีลาสโตเมอร์	30
2.14	โครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกพอลิไทรินไดอินอีลาสโตเมอร์ชนิดต่างๆ	31
2.15	ฐานฐานวิทยาของบล็อกโคพอลิเมอร์ของสไตรีนบิวทาไดอินสไตรีน	32
2.16	โครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกอีเทอร์เอสเทอร์อีลาสโตเมอร์	32
2.17	ฐานฐานวิทยาแบบเฟสต่อเนื่องร่วมของ TPO	33
2.18	ความแตกต่างของฐานฐานวิทยาระหว่าง TPO กับ TPV	34
2.19	การขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากยางและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	35
3.1	ขั้นตอนทดสอบรูปดัมเบลล์ (Die C) สำหรับการทดสอบความทนต่อแรงดึง	55
3.2	ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบ	56
3.3	ขั้นตอนทดสอบแบบมุ่มสำหรับการทดสอบการฉีกขาด	56
3.4	ภาพวาดแสดงความสูงของดินทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง	58
4.1	กราฟความเค้น-ความเครียดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติ 20 wt% ที่ผสมด้วยเครื่องผสมต่างชนิดกัน	61

รายการรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
4.2	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่างที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 20 wt% ผสมด้วยเครื่องผสมต่างชนิดกันและจำนวนรอบการผสมต่างกัน: (a) S1 (b) S2 (c) S3 (d) T1 (e) T2 (f) T3 และ (g) I	62
4.3	กราฟความเค้น-ความเครียดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติ 50 wt% ที่ผสมด้วยเครื่องผสมต่างชนิดกัน	64
4.4	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่างที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 50 wt% ผสมด้วยเครื่องผสมต่างชนิดกันและจำนวนรอบการผสมต่างกัน: (a) S1 (b) S2 (c) S3 (d) T1 (e) T2 (f) T3 และ (g) I	65
4.5	กราฟความเค้น-ความเครียดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	69
4.6	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ ทำการสกัดเอาเฟสยางออก: (a) ปริมาณยาง 5 wt% (b) ปริมาณยาง 10 wt% (c) ปริมาณยาง 30 wt% และ (d) ปริมาณยาง 50 wt%	71
4.7	กราฟความเค้น-ความเครียดของ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง ENR25 0 – 50 wt%	74
4.8	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 ทำการสกัดเอาเฟสยางออก: (a) ปริมาณยาง 5 wt% (b) ปริมาณยาง 10 wt% (c) ปริมาณยาง 30 wt% และ (d) ปริมาณยาง 50 wt%	76
4.9	กราฟความเค้น-ความเครียดของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง ENR50 0 – 50 wt%	79
4.10	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PBAT ผสมยาง ENR50 (a) ปริมาณยาง 5 wt% (b) ปริมาณยาง 10 wt% (c) ปริมาณยาง 30 wt% และ (d) ปริมาณยาง 50 wt%	80
4.11	มอดุลัสของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	83
4.12	ความเค้น ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	84
4.13	ความเครียด ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	85

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า	
4.14	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PBAT ผสมยางแต่ละชนิดที่มีปริมาณยาง 5 wt% ทำการสกัดยางออก: (a) ยางธรรมชาติ (b) ยาง ENR25 และ (c) ยาง ENR50	86
4.15	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PBAT ผสมยางแต่ละชนิดที่มีปริมาณยาง 10 wt% ทำการสกัดยางออก: (a) ยางธรรมชาติ (b) ยาง ENR25 และ (c) ยาง ENR50 เท่า	87
4.16	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PBAT ผสมยางแต่ละชนิดที่มีปริมาณยาง 30 wt% ทำการสกัดยางออก: (a) ยางธรรมชาติ (b) ยาง ENR25 และ (c) ยาง ENR50	87
4.17	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PBAT ผสมยางแต่ละชนิดที่มีปริมาณยาง 50 wt% ทำการสกัดยางออก: (a) ยางธรรมชาติ (b) ยาง ENR25 และ (c) ยาง ENR50	88
4.18	ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	89
4.19	ความแข็งของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	90
4.20	การกระด้างตัวของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	91
4.21	การยืดถาวรของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	92
4.22	กราฟความเค้น–ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับ ยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	93
4.23	กราฟความเค้น–ความเครียดของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	98
4.24	กราฟความเค้น–ความเครียดของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง ENR50 วัลคาไนซ์ 0 – 50 wt%	102
4.25	มอดุลัสของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%	106
4.26	ความเค้น ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	107
4.27	ความเครียด ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	108

รายการรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
4.28	ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	109
4.29	ความแข็งของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	110
4.30	การกระเด็งตัวของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	111
4.31	การยืดถาวรของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%	112
4.32	ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมยาง ENR: (a) ฟิล์ม PBAT (b) ฟิล์ม PBAT ผสมยาง ENR25 5 wt% (c) ฟิล์ม PBAT ผสมยาง ENR25 10 wt% (d) ฟิล์ม PBAT ผสมยาง ENR50 10 wt% (e) ฟิล์ม PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ 5 wt% และ (f) ฟิล์ม PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ 5 wt%	114
4.33	กราฟความเค้น – ความเครียดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติทดสอบตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD)	115
4.34	กราฟความเค้น – ความเครียดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร (transverse direction, TD)	116
4.35	กราฟความเค้น – ความเครียดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ทดสอบตามแนวเครื่องจักร	118
4.36	กราฟความเค้น – ความเครียดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	119
4.37	ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ทดสอบตามแนวเครื่องจักร	122
4.38	ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติและยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	123
4.39	มอดูลัสของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%	124
4.40	ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%	126

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.41 ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%	127
4.42 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT: (a) ก่อนฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน	129
4.43 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 5 wt: (a) ก่อนฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน	129
4.44 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 10 wt%: (a) ก่อนฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน	130
4.45 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 15 wt%: (a) ก่อนฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน	131
4.46 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 20 wt%: (a) ก่อนฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน	132
4.47 มอดูลัสของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 0 – 20 wt%	133
4.48 ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 0 – 20 wt%	134
4.49 ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วัน เดือนที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 0 – 20 wt%	136
4.50 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT: (a) ก่อนฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน	137
4.51 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 5 wt%: (a) ก่อนฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน	138

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.52 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 10 wt%: (a) ก่อนผึ่งดิน (b) ผึ่งดิน 30 วัน (c) ผึ่งดิน 60 วัน (d) ผึ่งดิน 90 วัน (e) ผึ่งดิน 120 วัน (f) ผึ่งดิน 150 วันและ (g) ผึ่งดิน 180 วัน	139
4.53 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 15 wt%: (a) ก่อนผึ่งดิน (b) ผึ่งดิน 30 วัน (c) ผึ่งดิน 60 วัน (d) ผึ่งดิน 90 วัน (e) ผึ่งดิน 120 วัน (f) ผึ่งดิน 150 วันและ (g) ผึ่งดิน 180 วัน	140
4.54 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 20 wt%: (a) ก่อนผึ่งดิน (b) ผึ่งดิน 30 วัน (c) ผึ่งดิน 60 วัน (d) ผึ่งดิน 90 วัน (e) ผึ่งดิน 120 วัน (f) ผึ่งดิน 150 วันและ (g) ผึ่งดิน 180 วัน	140
ก.1 DSC thermogram ของ PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 30 wt%	157
ก.2 DSC thermogram ของ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง 0 – 30 wt%	157
ก.3 DSC thermogram ของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง 0 – 30 wt%	158
ก.4 DSC thermogram ของ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 30 wt%	158
ก.5 DSC thermogram ของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 30 wt%	159
ก.6 DSC thermogram ของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ ที่มีปริมาณยาง 0 – 30 wt%	159

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ผลิตภัณฑ์พลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสำคัญมาอย่างยาวนาน มีบทบาทมากในชีวิตประจำวัน และยังมีแนวโน้มที่จะมากขึ้นในอนาคต ซึ่งสามารถนำมาแทนทรัพยากรธรรมชาติได้หลายอย่าง เช่น ไม้ เหล็ก เนื่องจากพลาสติกมีราคาถูก มีน้ำหนักเบาและมีขอบข่ายการใช้งานได้กว้าง และสามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกให้มีสมบัติต่างๆ ตามที่ต้องการได้ โดยขึ้นกับการเลือกใช้วัตถุดิบ ปฏิบัติการเคมี กระบวนการผลิต และกระบวนการขึ้นรูปต่างๆ และนอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงสมบัติได้ง่าย โดยการเติมสารเติมแต่ง เช่น สารเสริมสภาพพลาสติก สารปรับปรุงคุณภาพ สารเสริม สารคงสภาพ สารยับยั้งปฏิกิริยา สารหล่อลื่นและ ผงสี เป็นต้น ซึ่งพลาสติกที่ใช้แล้วมักถูกทิ้งเป็นขยะพลาสติก ส่วนหนึ่งถูกนำกลับมาใช้อีกในลักษณะต่างๆ กัน และอีกส่วนหนึ่งถูกนำไปกำจัดทิ้งโดยวิธีการต่างๆ การนำขยะพลาสติกไปกำจัดทิ้งโดยการฝังกลบเป็นวิธีที่สะดวกแต่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เพราะโดยธรรมชาติพลาสติกจะทยอยย่อยสลายได้ยาก จึงทับถมอยู่ในดิน และนับวันยังมีปริมาณมากขึ้นตามปริมาณการใช้พลาสติก ส่วนการเผาขยะพลาสติกก่อให้เกิดมลพิษและเป็นอันตรายอย่างมาก วิธีการแก้ปัญหาขยะพลาสติกที่ได้ผลคือ การนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ แม้ว่าเทคโนโลยีการนำพลาสติกที่ไม่ย่อยสลายหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ จะได้รับการพัฒนาอย่างไม่หยุดยั้ง แต่ก็ไม่สามารถแก้ปัญหาเรื่องต้นทุนการผลิตให้ลดต่ำลงในระดับที่ผู้ผลิตยอมรับได้ ประกอบกับความต้องการใช้พลาสติกและผลิตภัณฑ์พลาสติกมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงเกิดความกังวลเกี่ยวกับปริมาณของเสียที่เพิ่มขึ้น และทรัพยากรที่นับวันมีแต่จะลดน้อยลง ซึ่งหากได้มีการศึกษาเพื่อแสวงหาแหล่งวัตถุดิบชนิดใหม่ หรือวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymers) มาใช้ผลิตพลาสติกในอุตสาหกรรม น่าจะเป็นการเพิ่มและกระตุ้นความสนใจให้เกิดการนำพอลิเมอร์ชนิดใหม่นี้มาใช้ผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ง่ายต่อไปในอนาคตข้างหน้าด้วย

พอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรพทาเลต (polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) เป็นหนึ่งในวัสดุพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งเป็นพลาสติกยืดหยุ่นสูง น้ำหนักเบาสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกได้ง่าย จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกได้ ซึ่ง PBAT เตรียมจากพอลิเอสเทอร์ที่ผลิตจากปิโตรเลียม โดยโครงสร้างของ

โมเลกุลนั้นสามารถถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เป็นการย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่สมบูรณ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์จาก PBAT สามารถช่วยลดปริมาณขยะพลาสติก ลดต้นทุนในการกำจัดขยะ ดังนั้น PBAT จึงเป็นพลาสติกอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความน่าสนใจที่นำไปสู่ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อทดแทนพลาสติกที่ใช้อยู่ทั่วไปตามท้องตลาด แต่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง จึงเกิดแนวคิดที่จะนำยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ มาผสม เพื่อเป็นการลดต้นทุน และปรับปรุงสมบัติบางประการให้ดีขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่ในประเทศ มีราคาต่ำกว่า PBAT และมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น มีการกระดอนตัวดี ทนต่อแรงดึงได้ดี ทนต่อการฉีกขาด และทนต่อการขีดถู

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอสเทอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพผสมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสม
3. เพื่อศึกษาการเป่าขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม
4. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการเชื่อมสภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ เช่น เครื่องมือที่ใช้ในการผสมและสภาวะการผสม
2. ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ เช่น สมบัติการทนต่อแรงดึง (tensile properties testing) สมบัติการต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance testing) สมบัติการยืดถาวร (tension set testing) และความแข็ง (hardness testing) เป็นต้น
3. ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)
4. ศึกษาสภาวะในการเป่าขึ้นรูปและศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยคัดเลือกจากสูตรที่มีสมบัติเชิงกลดีจากข้อ 3
5. ศึกษาการเชื่อมสภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมโดยการฝังดินเป็นระยะเวลา 30 – 180 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ผสมย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มี
ยางธรรมชาติเป็นส่วนประกอบ
2. เป็นแนวทางในการลดปัญหาขยะพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.1.1 ความหมายและคำจำกัดความ (Muller *et al.*, 2003)

ในอนาคตแนวโน้มการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics) เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการค้นพบและพัฒนากระบวนการผลิตใหม่ๆ ทำให้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีราคาต่ำลงและมีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น แต่บางครั้งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ไม่เกิดการย่อยสลายผ่านกระบวนการทางชีวภาพอย่างแท้จริง ดังนั้นเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว จึงมีหลายองค์กรทั่วโลกได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้นและให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งมีความแตกต่างกัน ดังนี้

- ASTM D6400-99 – biodegradable plastic is a degradable plastic in which the degradation results from the action of naturally occurring microorganisms such as bacteria, fungi and algae.

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้เนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย ราและสาหร่าย

- ISO 472:1998 – biodegradable plastic is a plastic designed to undergo a significant change in its chemical structure under specific environmental conditions resulting in a loss of some properties that may vary as measured by standard test methods appropriate to the plastic and application in a period of time that determines its classification. The change in chemical structure results from the action of naturally occurring microorganisms.

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็น

เกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น

- BPS Japan (1994) – biodegradable plastics are polymeric materials which are changed into lower molecular weight compounds where at least one step in the degradation process is through metabolism in the presence of naturally occurring organism.

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ วัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงได้โดยมีอย่างน้อย 1 ขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ

- DIN FNK103.2 (1993) – a plastic material is called biodegradable if all its organic compounds undergo a complete biodegradation process. Environmental condition and rates of biodegradation are to be determined by standardized test methods.

วัสดุพลาสติกจะได้อธิบายว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ก็ต่อเมื่อสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม และมีอัตราการย่อยสลายอยู่ภายใต้ข้อกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐาน

- CEN (1993) – a degradable material in which the degradation results from the action of microorganisms and ultimately materials are converted to water, carbon dioxide and/or methane and a new cell biomass.

วัสดุย่อยสลายได้ คือ วัสดุที่การย่อยสลายเป็นผลมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ/หรือ แก๊สมีเทน และมวลชีวภาพใหม่ เป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย

2.1.2 ประเภทของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Mohanty *et al.*, 2005)

ประเภทของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพแบ่งตามแหล่งที่มาได้ 3 ประเภท คือ

1. พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ได้จากแหล่งวัตถุดิบที่ทดแทนใหม่ได้ (renewable resource-based)

- พอลิไฮดรอกซีอัลคานอยด์ (polyhydroxyalcanoates, PHAs)
- พอลิแลคไทด์ (polylactides, PLA)
- เซลลูโลสเอสเทอร์ (cellulose esters)

2. พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ได้จากปิโตรเคมี (petroleum/fossil fuel-based)

- อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyesters)
- อะลิฟาติก-อะโรมาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic-aromatic polyesters)
- พอลิเอสเทอร์เอไมด์ (polyester amide)
- พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol)

3. พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ได้จากการผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายทางชีวภาพที่ได้จากแหล่งวัตถุดิบที่ทดแทนใหม่ได้กับปิโตรเคมี เช่น

- SORONA™ เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง 1,3-โพรแพนไดโอดอน (1,3 propane diol) ซึ่งได้มาจากข้าวโพด กับเทเรพทาริกแอซิด (terephthalic acid) ซึ่งได้จากปิโตรเคมี

- พอลิเมอร์ผสมระหว่าง

- พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 2 ชนิดหรือมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป เช่น แบ่งผสมกับ PLA

- พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพกับพอลิเมอร์ที่ได้จากปิโตรเคมี เช่น แบ่งผสมกับพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE)

- น้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกไซด์ (epoxidized soybean oil, ESO) ผสมกับอีพ็อกซีเรซิน (epoxy resin) ที่ได้จากปิโตรเคมี

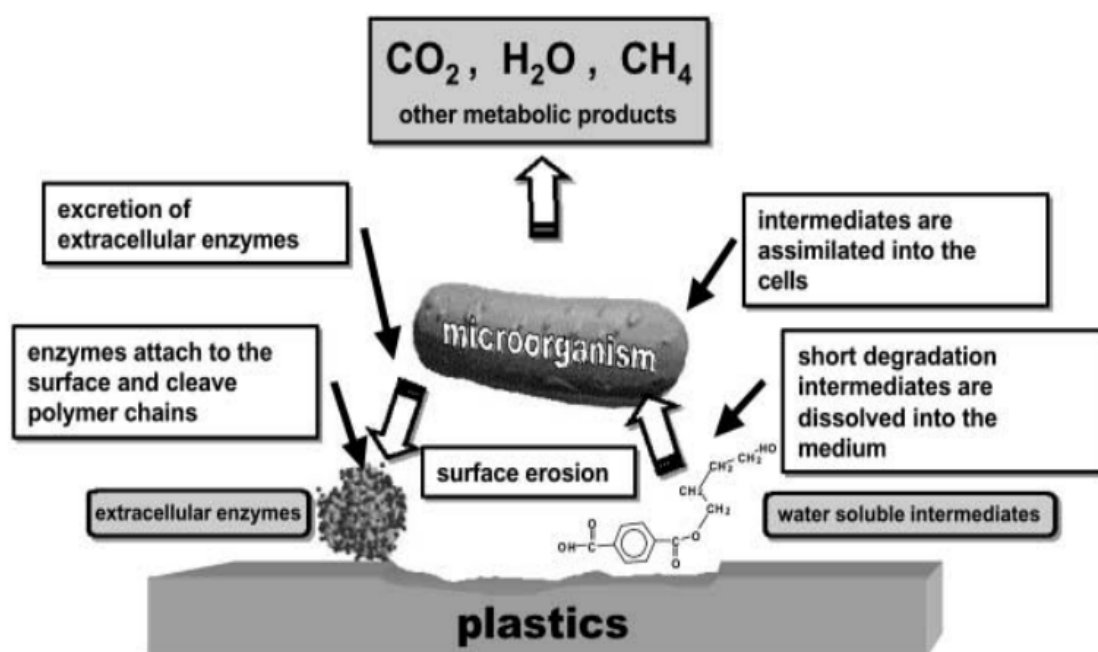
พอลิเมอร์ผสมที่ประสบความสำเร็จเป็นวัสดุชนิดใหม่ได้สมบัติตามที่ต้องการ วัสดุดังกล่าวอาจเรียกว่าเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพและอาจจะย่อยสลายทางชีวภาพหรือไม่ก็ได้

นอกจากแบ่งตามแหล่งที่มาแล้วยังสามารถแบ่งตามกลไกของการย่อยสลาย (ชนาวัต, 2549) ได้ดังนี้

1. พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable plastics) เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ชนิดหนึ่งที่มีกลไกการย่อยสลายด้วยเอนไซม์และแบคทีเรียในธรรมชาติ เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ มวลชีวภาพ ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืช รวมถึงมันสำปะหลังและข้าวโพดที่เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังนั้นวงจรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงมีรูปแบบคือ มีสมบัติในการใช้งานเช่นเดียวกับพลาสติกโดยทั่วไป แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เมื่อทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ไปเป็นขยะและอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมคือ มีแบคทีเรียและเอนไซม์ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นก็จะเกิดการย่อยสลาย

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์ ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรก

ของการย่อยสลาย จึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอน ที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้ายคือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass) ซึ่งกลไกการย่อยสลายโดยเอนไซม์แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กลไกการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Muller, 2003)

2. พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation plastics) หรือบางครั้งเรียกว่า พลาสติกที่สลายตัวได้โดยไม่ต้องพึ่งพาจุลินทรีย์ (bioerodable plastics) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติกเป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจนและความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, $ROOH$) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) ของแสงและความร้อนจะทำให้ $ROOH$ แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์

ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้น ในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

3. พลาสติกย่อยสลายด้วยแสง (photodegradable plastics) การย่อยสลายด้วยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระที่ไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการเคลือบด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง ประเทศฝรั่งเศสใช้พลาสติกประเภทนี้ ขนาดกว้างประมาณ 1 เมตร ปลูกลงบนทุ่งนาเพื่อกักเก็บความร้อนในดินและเร่งผลผลิต อายุใช้งานอยู่ระหว่าง 1-3 ปีก่อนฝังลงไปกับดิน แต่พลาสติกชนิดนี้ต้องใช้ในภูมิประเทศที่มีแสงแดดสม่ำเสมอ เพื่อให้สลายตัวตามอัตราที่คาดการณ์ได้

4. พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic degradation plastics) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮไดรด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยทั่วไปปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (non-catalytic hydrolytic) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (external catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (enzyme) เช่น depolymerase, lipase, esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลน์ (alkaline metal) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุล

ของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

2.1.3 กลไกการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (ชนาวดี, 2549)

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีกลไกการย่อยสลายแบ่งเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1) การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) เป็นกระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ สิ่งสำคัญคือ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพควรเกิดการย่อยสลายที่สมบูรณ์ สะอาด ไม่เป็นพิษ ในช่วงเวลาและสภาวะแวดล้อมที่กำหนด ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบขนาดเล็กที่มีความเสถียรและพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน และน้ำ

2) การคอมโพสท์ (composting) เป็นกระบวนการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน ภายใต้สภาวะที่มีการควบคุม พลาสติกจะเกิดการย่อยสลายและเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารที่มีลักษณะคล้ายฮิวมัส (humus) หรือดินดำ นอกจากนี้ยังมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และแร่ธาตุต่างๆ เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ไม่เหลือเศษวัสดุขนาดใหญ่ ตกค้างและไม่เป็นพิษ สามารถนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช

พลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้โดยคอมโพสท์ (compostable plastic) นั้นต้องมีอัตราการย่อยสลายในคอมโพสท์ไม่ช้ากว่าเซลลูโลส ซึ่งเป็นวัสดุมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับ

3) การย่อยสลายทางชีวภาพผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydro biodegradation) เป็นการย่อยสลาย 2 ขั้นตอนโดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก่อนแล้วจึงเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ

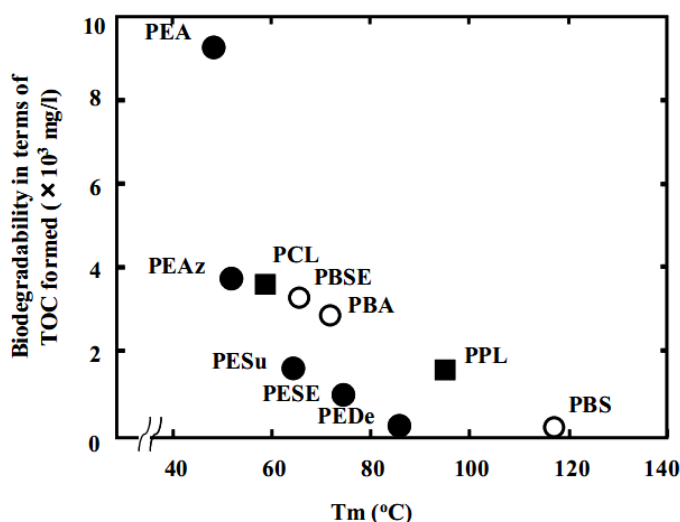
4) การย่อยสลายทางชีวภาพโดยแสง (photo biodegradation) เป็นการย่อยสลาย 2 ขั้นตอนโดยผ่านปฏิกิริยาย่อยสลายโดยแสงก่อน แล้วจึงเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Tokiwa et. al, 2009)

สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ สภาพพื้นผิว (พื้นผิวที่มีสมบัติที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ) โครงสร้างทางเคมี น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว

(melting temperature, T_m) มอดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ความเป็นผลึก (crystallinity) และโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์มีอิทธิพลต่อกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ

น้ำหนักโมเลกุลเป็นสิ่งสำคัญในการย่อยสลายทางชีวภาพเนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลเป็นสิ่งที่กำหนดสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของพอลิเมอร์ น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มากขึ้นลดความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพลง เช่นพอลิคาโปแลกโตน (polycaprolactone, PCL) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก (น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงจำนวน (M_n) มากกว่า 4,000) ย่อยสลายด้วยเอนไซม์ *Rhizopus delemar* ช้ากว่า PCL ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงจำนวนน้อย นอกจากนี้ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ก็มีผลกระทบต่ออัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ ปริมาณผลึกเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจาก เอนไซม์ส่วนใหญ่จะทำการย่อยส่วนที่เป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์ เนื่องจากโมเลกุลในส่วน ออสัณฐานอยู่รวมกันอย่างหลวมๆ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการย่อยสลายได้ง่าย และส่วนที่เป็นผลึกของพอลิเมอร์มีความทนทานมากกว่าส่วนที่เป็นอสัณฐาน เช่นอัตราการย่อยสลายของ PLA ลดลงเมื่อปริมาณผลึกของพอลิเมอร์มากขึ้น จากรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอสเทอร์มีผลกระทบต่ออัตราการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ของพอลิเมอร์ เมื่ออุณหภูมิหลอมเหลวสูงขึ้นพบว่าความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพลดลง โดยทั่วไปคำนวณได้จากสูตรที่ 2.1 ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าปฏิกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มีผลต่อค่า ΔH และพลังงานที่ใช้ในการหมุนสายโซ่สัมพันธ์กับความยืดหยุ่น (flexibility) ของโมเลกุลพอลิเมอร์ซึ่งมีผลต่อ ΔS



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหลอมเหลวและความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิเอสเทอร์ด้วยเอนไซม์ *R. arrhizus* (Tokiwa et. al, 2009)

$$T_m = \frac{\Delta H}{\Delta S} \quad (2.1)$$

เมื่อ ΔH เป็นการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี (enthalpy) ในระหว่างการหลอมเหลว
 ΔS เป็นการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (entropy) ในระหว่างการหลอมเหลว

โครงสร้างทางเคมีของอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate) พอลิยูรีเทน (polyurethane) และพอลิเอไมด์ (polyamides) และอุณหภูมิหลอมเหลวแสดงในตารางที่ 2.1 อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์และพอลิคาร์บอเนตเป็นพอลิเมอร์ใช้เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเนื่องจากความอ่อนแอของโครงสร้างที่ง่ายต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์และแบคทีเรีย เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิหลอมเหลวพบว่า อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์และพอลิคาร์บอเนตมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่าอะลิฟาติกพอลิยูรีเทนและพอลิเอไมด์ (ไนลอน) อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิยูรีเทนและพอลิเอไมด์ที่สูงเป็นสาเหตุมาจากมีค่า ΔH สูงเนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนในสายโซ่พอลิเมอร์

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีและอุณหภูมิหลอมของของอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ พอลิคาร์บอเนต พอลิยูรีเทนและพอลิเอไมด์ (Tokiwa *et. al*, 2009)

ชื่อ	โครงสร้างทางเคมี	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
พอลิเอสเทอร์	-O-(CH ₂) ₆ -O-CO-(CH ₂) ₄ -CO-	60
พอลิคาร์บอเนต	-O-(CH ₂) ₄ -O-CO-O-(CH ₂) ₄ -O-CO-	65
พอลิยูรีเทน	-NH-(CH ₂) ₆ -NH-CO-O-(CH ₂) ₄ -O-CO-	180
พอลิเอไมด์	-NH-(CH ₂) ₆ -NH-CO-(CH ₂) ₆ -CO-	240
พอลิเอไมด์	-NH-(CH ₂) ₆ -NH-CO-(CH ₂) ₄ -CO-	265

2.2 อะลิฟาติก-อะโรมาติก โคพอลิเอสเทอร์ (aliphatic-aromatic copolyesters, AACs) (Shah *et al.*, 2008)

อะลิฟาติก-อะโรมาติกโคพอลิเอสเทอร์เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ ซึ่งมีสมบัติการย่อยสลายทางธรรมชาติร่วมกับอะโรมาติกพอลิเอสเทอร์ ซึ่งมีความแข็งแรงและทนความร้อน ทำให้ AACs มีสมบัติเหมาะสมในการใช้งานเป็นพลาสติกย่อย

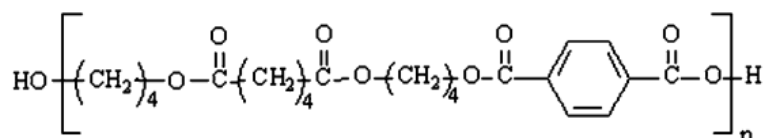
สลายได้อย่างสมบูรณ์ที่มีสมบัติเหมือนพลาสติกทั่วไป เช่น พอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรพทาเรต (polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT)

AACs มีข้อเสียเปรียบในเชิงการค้าบางประการ เช่น กฎหมายของบางประเทศกำหนดความแตกต่างระหว่างพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้กับ ACCs ซึ่งเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ใช้วัตถุดิบจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี เช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป เช่นประเทศเยอรมนีได้กำหนดให้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพต้องมีส่วนประกอบที่ใช้วัตถุดิบที่ปลูกหรือผลิตทดแทนใหม่ได้อย่างน้อย 50%

PBAT ทางการค้ามี 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ EcoflexTM ผลิตโดยบริษัท BASF และ Eastar BioTM ผลิตโดยบริษัท Eastman ซึ่งแต่ละบริษัทได้ผลิต AACs เกaredต่างๆ โดยการควบคุมปริมาณกิ่งก้านสาขา และความยาวสายโซ่เพื่อให้มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานด้านต่างๆ AACs มีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) โดยเฉพาะเกรดเป่าฟิล์ม รวมทั้งมีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานในรูปของฟิล์มยึดห่ออาหาร (cling film) เนื่องจากความโปร่งใส และมีความยืดหยุ่น เหมาะสมสำหรับใช้เป็นฟิล์มห่ออาหารผลไม้และผัก

2.2.1 พอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรพทาเรต (polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) (Yamamoto *et al.*, 2005)

PBAT เป็นอะลิฟาติก-อะโรมาติกพอลิเอสเทอร์ประกอบด้วย 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol), อะดิพิคแอซิด (adipic acid) และเทเรพทาริกแอซิด (terephthalic acid) มีโครงสร้างทางเคมีแสดงในรูปที่ 2.3 และสมบัติของ PBAT เปรียบเทียบกับ LDPE แสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ PBAT (Zhang *et al.*, 2009)

PBAT มีความหนาแน่น 1.25 g/cm³ ซึ่งมากกว่า LDPE 35% และมีปริมาตรการหลอมไหล 2.5 – 4.5 ml/10 min ซึ่งมากกว่า LDPE (0.8 – 1.2 ml/10 min) แต่ PBAT ขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิ 140 – 170°C ซึ่งต่ำกว่า LDPE ที่มีอุณหภูมิการขึ้นรูป 190 – 220°C และมีความแข็งและอุณหภูมิการอ่อนตัว (vicat softening temperature) ต่ำกว่า LDPE ทั้ง PBAT

และ LDPE มีอุณหภูมิหลอมเหลวในช่วงเดียวกันคือ 110 – 120°C การวัดการหดตัวควรทำการวัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C

ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT มีค่ามากกว่า LDPE ค่าการซึมผ่านของออกซิเจนของ LDPE เป็น 2 เท่าของ PBAT แต่ในทางตรงกันข้ามการซึมผ่านของไอน้ำของ PBAT มากกว่า LDPE (ตารางที่ 2.3) PBAT ค่อนข้างโปร่งแสงน้อยกว่า LDPE

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของ PBAT และ LDPE (Yamamoto *et al.*, 2005)

สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	PBAT [*]	LDPE ^{**}
ความหนาแน่น (density)	g/cm ³	ISO 1183	1.25 – 1.27	0.92 – 0.93
อัตราการหลอมไหล (MFR) 190°C, 2.16 kg	g/10 min	ISO 1133	2.7 – 4.9	0.6 – 0.9
ปริมาตรการหลอมไหล (MVR) 190°C, 2.16 kg	ml/10 min	ISO 1133	2.5 – 4.5	0.8 – 1.2
อุณหภูมิหลอมเหลว (T _m)	°C	DSC	110 - 120	111
อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (T _g)	°C	DSC	- 30	- 125
ความแข็ง (shore D)	-	ISO 868	32	48
อุณหภูมิการอ่อนตัว (vicat VST A/50)	°C	ISO 306	91	96

หมายเหตุ^{*} Ecoflex[®] F BX 7011

^{**} Lupolen 2420 F

2.2.2 การนำไปใช้งาน (Yamamoto, *et al.*, 2005)

1) ถุงสำหรับขยะอินทรีย์ ขยะภายในครัวสามารถเก็บและหมักด้วยถุงย่อยสลายทางชีวภาพได้ PBAT เหมาะที่จะทำเป็นถุงสำหรับหมัก เนื่องจากเป็นฟิล์มที่มีความแข็งแรงแม้ขณะเปียกและเป็นเวลานาน

2) ฟิล์มคลุมดิน ใช้คลุมดินก่อนเก็บเกี่ยวจะได้ผลผลิตสูงและคุณภาพผลผลิตดีขึ้น ประโยชน์ของฟิล์มคลุมดินทำจาก PBAT คือในการเก็บเกี่ยวสามารถไถพร้อมกับกากพีชลงในดิน

3) การเคลือบผิววัสดุ เช่นผิวกระดาษมีความจำเป็นสำหรับกระดาษที่สัมผัสกับน้ำหรือไขมัน การใช้ PBAT เคลือบเป็นชั้นที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นข้อดีสำหรับการกำจัดขยะโดยการหมัก การนำไปใช้งานที่น่าสนใจคือ บรรจุภัณฑ์อาหาร เช่น ถ้วยเครื่องดื่ม บรรจุภัณฑ์อาหาร กล่องหรือภาชนะสำหรับอาหารแช่แข็ง เป็นต้น

4) ฟิล์มใสสำหรับห่ออาหาร โดยการเพิ่มสารตัวเติมและเพิ่มประสิทธิภาพสภาวะการขึ้นรูป ฟิล์มโปร่งใสสามารถขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม ฟิล์มเหล่านี้สามารถใช้สำหรับการห่ออาหารรวมทั้งเนื้อสัตว์ ผักและผลไม้

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม LDPE (Yamamoto *et al.*, 2005)

สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	PBAT *	LDPE **
ความโปร่งแสง	%	ASTM D 1003	82	89
มอดุลัส	N/mm ²	ISO 527	95/80	240/200
ความต้านทานต่อแรงดึง	N/mm ²	ISO 527	35/44	26/20
ความต้านทานต่อการฉีกขาด	N/mm ²	ISO 527	36/45	-
ระยะยืด ณ จุดขาด	%	ISO 527	560/710	300/600
พลังงานในการแตกหัก	J/mm	DIN 53373	24	5.5
อัตราการซึมผ่าน:				
ออกซิเจน	ml/(m ² d bar)	ASTM D 3985	1400	2900
ไอน้ำ	g/(m ² d)	ASTM F 1249	170	1.7

หมายเหตุ * Ecoflex[®] F BX 7011

** Lupolen 2420 F

2.3 ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) (Klingensmith และ Rodgers, 2004)

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่สามารถเสียรูปและคืนตัวได้อย่างรวดเร็ว มีความต้านทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) มีความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และมีความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) มาก แต่มีความต้านทานต่อความล้า (fatigue resistance) น้อย

โครงสร้างของยางธรรมชาติคือซิสพอลิไอโซพรีน แสดงในรูปที่ 2.4 ยางธรรมชาติมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างโดยน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงระหว่าง 7,000 ถึง 1,000,000 น้ำยางธรรมชาติประกอบด้วยเนื้อยางแห้ง 30-35% ซีรัม 60% และองค์ประกอบอื่นๆ 5-10% เช่น กรดไขมัน กรดอะมิโน โปรตีน แป้ง เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็น

2.3.1 ประเภทของยางแท่ง (Klingensmith และ Rodgers, 2004)

ในปี 1964 องค์การมาตรฐานสากล (International Standards Organization, ISO) ได้กำหนดข้อมูลทางเทคนิคเฉพาะสำหรับยางแท่ง (ISO 2000) โดยยางแท่ง (technically specified rubber, TSR) อยู่ในรูปแบบก้อน โดยมีน้ำหนักปกติ 33.3 kg สำหรับตลาดนานาชาติและ 25.0 kg ในประเทศอินเดีย ยางแท่งทั้งหมดต้องเป็นไปตามข้อกำหนดเฉพาะของแต่ละประเทศหรือ ISO 2000 แสดงในตารางที่ 2.4 ยางแท่งผลิตจากน้ำยางสดหรืออาจใช้ยางที่จับตัวแล้วหรือยางแท่ง เช่น ยางแผ่นดิบ ยางกันถ้วย ซียาง เศษยาง มาเป็นวัตถุดิบ วิธีการผลิตคือ ตัดย่อยก้อนยางให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ล้างสิ่งสกปรกออก แล้วนำยางไปอบแห้ง แล้วอัดเป็นแท่งตามขนาดที่ต้องการ ทั้งนี้มาเลเซียเป็นประเทศแรกที่คิดค้นพัฒนาการผลิตยางแท่งเพื่อแข่งขันกับยางสังเคราะห์ และใช้วิธีตรวจสอบคุณสมบัติของยางตามมาตรฐานสากลเป็นเกณฑ์กำหนดชนิดของยางแท่งแทนการจัดชนิดด้วยสายตาแบบที่ใช้กับยางแผ่นรมควัน ต่อมาประเทศผู้ผลิตยางธรรมชาติอื่น ๆ ได้ผลิตยางแท่งตาม และกำหนดมาตรฐานการจัดชนิดยางแท่งแบบเดียวกับประเทศมาเลเซีย แต่ใช้ชื่อเรียกต่างออกไปเป็นของตนเอง

ISO แบ่งมาตรฐานยางแท่งไว้ 6 ประเภท ดังนี้

1. TSR CV โดย CV ย่อมาจาก constant viscosity หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำยางและมีความหนืดคงที่ ความแข็งของยางชนิดนี้ควรมีค่า 8 หน่วยความแข็ง ยางแท่ง TSR CV โดยปกตินี้มักว่าประเภททั่วไป ประกอบกับความหนืดที่คงที่ทำให้สามารถลดขั้นตอนการบดยางลง โดยเมื่อทำการผสมยางจะพันลูกกลิ้งทันที ข้อดีอื่นๆของยาง TSR CV เช่น ลดเวลาในการผสม ทำให้ได้ผลผลิตมาก ลดเศษและของเสียลงเนื่องจากเป็นวัสดุที่คงรูปได้ดี มีความแข็งแรงของยางดิบ (green strength) มาก ยาง TSR CV มีความหนืดแตกต่างกันโดยปกติมีความหนืด 50 และ 60 ยางแท่งชนิดนี้สามารถใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง เช่น กันชนสำหรับรถไฟ ยางรองคอสพาน ระบบกันสั่นสะเทือนของยานพาหนะ ดอกยางรถบรรทุกขนาดใหญ่และสายพาน เป็นต้น

2. TSR L เป็นผลิตภัณฑ์ยางแท่งที่เป็นสีอ่อนจากน้ำยางคุณภาพสูง มีปริมาณกำมะถันและสิ่งสกปรกน้อย ข้อดีของยางแท่ง TSR L คือมีสีอ่อนและทนต่อการบ่มเร่งทางความร้อน มีความต้านทานต่อแรงดึง โมดูลัสและระยะยืด ณ จุดขาดสูง ยางแท่ง TSR L สามารถใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีอ่อนและโปร่งแสง เช่น สิ่งทอ ยางวง ขวดน้ำร้อน ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ ลูกกลิ้งขนาดใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ ปลอดภัยเคเบิลและปะเก็น เป็นต้น

3. TSR 5 เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจับตัวของน้ำยางสด ยางแผ่นรมควันหรือยางแผ่นอบ ยางแท่ง TSR 5 ใช้สำหรับวัตถุประสงค์โดยทั่วไปและผลิตภัณฑ์จากการอัดรีด

ชั้นส่วนขนาดเล็กในยานพาหนะ เช่น ยางรองคอคสะพาน กาวและส่วนประกอบในยางรถยนต์ เป็นต้น

4. TSR 10 เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจับตัวน้ำยางสดหรือยางแผ่นไม่รมควัน ยางแท่ง TSR 10 มีข้อดีคือ มีความหนืดต่ำ และทำการผสมได้ง่าย ใช้ในการผลิตยางรถยนต์ สายพานลำเลียงและรองเท้า เป็นต้น

5. TSR 20 เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจับตัวน้ำยางสดหรือยางแผ่นไม่รมควัน ยางแท่ง TSR 20 สามารถแปรรูปและมีสมบัติทางกายภาพดี มีความหนืดต่ำและง่ายต่อการผสม ทำให้ลดขั้นตอนการบดยาง นิยมใช้ในการผลิตยางรถยนต์ สายพานลำเลียง

6. TSR 50 เป็นชนิดที่ต่ำที่สุดของยางแท่ง TSR และผลิตจากการจับตัวของน้ำยางเก่าหรือยางที่บางส่วนเสื่อมสภาพ

ตารางที่ 2.4 ประเภทของยางแท่งตามมาตรฐาน ISO 2000 (Klingensmith และ Rodgers, 2004)

สมบัติ	ชนิด					
	TSR CV	TSR L	TSR S	TSR 10	TSR 20	TSR 50
ปริมาณสิ่งสกปรก ไม่เกิน (wt%)	0.05	0.05	0.05	0.1	0.2	0.5
ปริมาณเถ้าไม่เกิน (wt%)	0.6	0.6	0.5	0.75	1	1.5
ปริมาณไนโตรเจน ไม่เกิน (wt%)	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6
ปริมาณสิ่งระเหย ไม่เกิน (wt%)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ความอ่อนตัวเริ่มแรก ไม่ต่ำกว่า (P_0)	-	30	30	30	30	30
ดัชนีความอ่อนตัว ไม่ต่ำกว่า (PRI)	60	60	60	50	40	30
สี (วัดด้วยโวลิวอลต์) ไม่เกิน	-	6	-	-	-	-
ความหนืด	60 ± 5	-	-	-	-	-

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานยางแท่งของประเทศไทย (ประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2548)

ชนิดและวัตถุดิบ	STR XL	STR 5	STR 5 CV	STR 10	STR 10 CV	STR 20	STR 20 CV
	น้ำยาง	น้ำยาง/ยางแผ่น		ยางก้อน/ยางแผ่น			
ปริมาณสิ่งสกปรกไม่เกิน (wt%)	0.02	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
ปริมาณเถ้าไม่เกิน (wt%)	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	0.8
ปริมาณไนโตรเจนไม่เกิน (wt%)	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
ปริมาณสิ่งระเหยไม่เกิน* (wt%)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ความอ่อนตัวเริ่มแรกไม่ต่ำกว่า (P ₀)	35	30	-	30	-	30	-
ดัชนีความอ่อนตัวไม่ต่ำกว่า (PRI)	60	60	60	50	50	40	40
สี (วัดด้วยโลวิบอลต์)ไม่เกิน	4	-	-	-	-	-	-
ความหนืด	-	-	**	-	**	-	**
แถบสี	ฟ้า	เขียวอ่อน	ตัวอักษรขาวบนพื้นเขียว	น้ำตาล	ตัวอักษรขาวบนพื้นน้ำตาล	แดง	ตัวอักษรขาวบนพื้นแดง

* ขีดจำกัดของผู้ผลิตไม่เกิน 0.5%

** ขีดจำกัดของผู้ผลิต คือ

STR 5CV มีค่าความหนืด 70 (+7, -5), 60 (+7, -5), 50 (+7, -5) และ 40 (+7, -5)

STR 10CV มีค่าความหนืด 60 (+7, -5)

STR 20CV มีค่าความหนืด 65 (+7, -5)

สำหรับประเทศไทยได้กำหนดมาตรฐานยางแท่งเป็น STR (standard Thai rubber) จำแนกออกเป็น 7 ประเภท คือ STR XL STR 5 STR 5CV STR 10 STR 10CV STR 20

STR 20CV โดยยางแท่ง STR 20 เป็นประเภทยางแท่งที่มีปริมาณส่งออกมากที่สุดของไทย ทั้งนี้ยางแท่งส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยางยานพาหนะ และปัจจุบันประเทศผู้ซื้อ มีแนวโน้มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งทดแทนยางแผ่นรมควันมากขึ้น เพราะยางแท่งมีการกำหนดคุณภาพเป็นมาตรฐานดีกว่ายางแผ่นรมควัน ทำให้ได้ผลผลิตที่ดีขึ้น นำไปแปรรูปได้ง่ายกว่า และขนส่งเคลื่อนย้ายโดยเครื่องจักรได้สะดวกกว่ายางแผ่นที่ต้องระมัดระวังมิให้ฉีกขาด อีกทั้งราคาโดยเฉลี่ยยังถูกกว่ายางแผ่นรมควัน ประเทศไทยมีมาตรฐานยางแท่งSTR ตามประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เรื่องการกำหนดมาตรฐานยางและวิธีการมัดยางและการบรรจุหีบห่อยางเพื่อการส่งออก แสดงในตารางที่ 2.5

หากเปรียบเทียบมาตรฐานยางแท่งไทยกับมาตรฐานยางแท่งสากลในเกรดเดียวกัน จะพบว่า มาตรฐานยางแท่งไทยนั้นมีความเข้มงวดมากกว่า เช่น มาตรฐานของ STR 20 กำหนดให้มีปริมาณสิ่งสกปรกที่สามารถเจือปนได้ไม่เกินกว่า 0.16% ในขณะที่มาตรฐานสากลของ TSR 20 กำหนดไว้ไม่เกินกว่า 0.20% หรือ STR 20 กำหนดปริมาณเถ้าไว้ไม่เกินกว่า 0.80% แต่ TSR 20 กำหนดไว้กว้างกว่า คือ ไม่เกินกว่า 1% ทั้งนี้ ตารางมาตรฐานดังกล่าว เป็นข้อกำหนดกลางที่ใช้ร่วมกัน บริษัทผู้ซื้อยางแท่งอาจมีการระบุข้อกำหนดอื่นเพิ่มเติมในการตกลงซื้อขายกับบริษัทผู้ผลิต เพื่อให้ยางแท่งที่ซื้อมานั้นมีคุณภาพตรงตามความต้องการสำหรับการนำไปผลิตสินค้าอื่นต่อไป

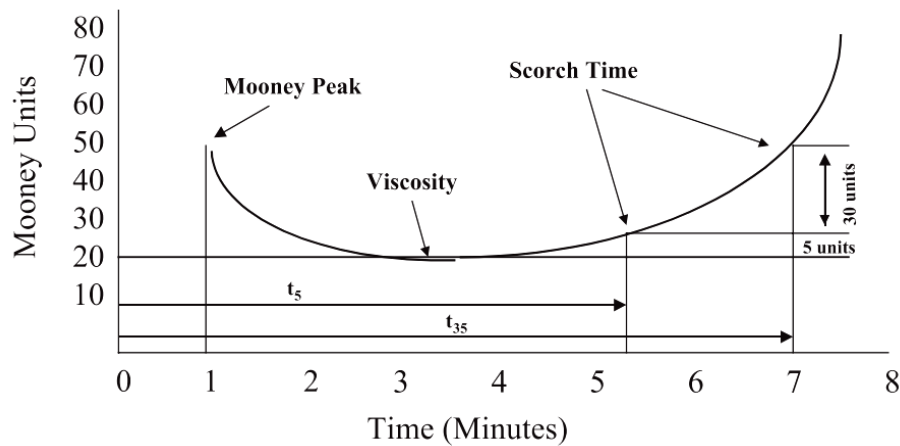
2.3.2 ความหนืดและความเสถียรของความหนืดของยางธรรมชาติ

(Klingensmith และ Rodgers, 2004)

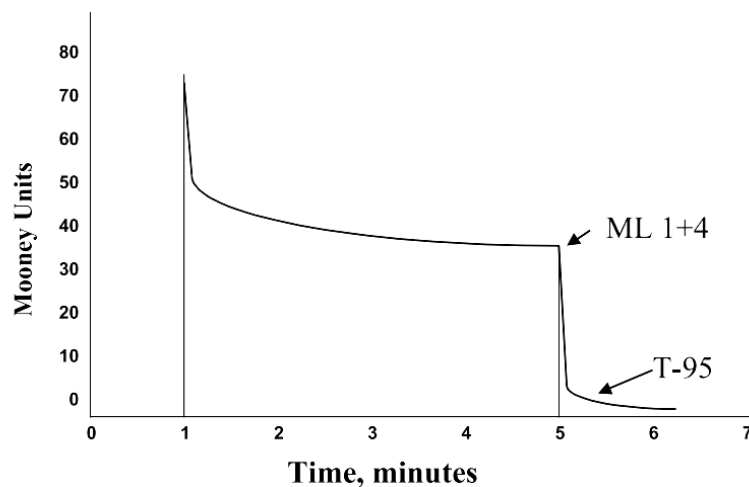
สมบัติของยางธรรมชาติมีความสำคัญมากที่สุดในการใช้งานในอุตสาหกรรมยางรถยนต์หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้แก่ ความหนืด การซึมของกรดไขมัน (fatty acid bloom) และสมบัติทางกายภาพ ใน 3 ตัวแปรนี้ความหนืดมีความสำคัญมากที่สุด ซึ่งความหนืดสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุล การกระจายน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณของวัสดุอื่นๆที่ผสมในพอลิเมอร์ เช่น เรซินน้ำหนักโมเลกุลต่ำ กรดไขมันและผลิตภัณฑ์ธรรมชาติอื่นๆ ความหนืดมีอิทธิพลต่อการผสมในช่วงเริ่มต้นของยางธรรมชาติกับส่วนผสมอื่นๆ และกระบวนการแปรรูป

วิธีวัดความหนืดของยางธรรมชาติมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมที่สุดคือการวัดความหนืดมูนนี่ (mooney viscosity) ซึ่งเป็นการวัดแรงบิด (torque) ที่ใช้ในการหมุนจานโลหะในยางตามมาตรฐาน ASTM D 1646 standard test methods for mooney viscosity, stress relaxation, and prevulcanization characteristics (mooney viscometer) ปกติความหนืดอยู่ในช่วง 45 ถึง 100 ขึ้นไป ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดความหนืดประกอบด้วย

1. สมบัติก่อนการวัลคาไนซ์หรือความต้านทานต่อการคงรูปก่อนเวลา (scorch) สำหรับยางที่ผสมสารเคมี โดยทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 120°C ถึง 135°C แสดงดังรูปที่ 2.5
2. พีคของความหนืด (mooney peak) ซึ่งเป็นความหนืดเริ่มต้นที่จุดเริ่มต้นของการทดสอบและความแข็งแรงของยางดิบและสามารถวัดระยะเวลาในการเก็บรักษา
3. ความหนืดโดยปกติวัดที่อุณหภูมิ 100°C (รูปที่ 2.6) พบว่าขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล โครงสร้างโมเลกุล เช่น สเตอริโอเคมี (stereochemistry) สายโซ่พอลิเมอร์ และส่วนที่ไม่ใช่ยาง ความหนืดมูนีสามารถแสดงเป็น ML 1+4 (คือ ใช้จานหมุนขนาดใหญ่ อุณหภูมิทดสอบ 1 min และทดสอบ 4 min)



รูปที่ 2.5 mooney scorch โดยปกติที่อุณหภูมิ 121°C และ 135°C (Klingensmith และ Rodgers, 2004)



รูปที่ 2.6 ความอ่อนตัว (mooney plasticity) และการคลายความเค้น (stress relaxation) (Klingensmith และ Rodgers, 2004)

4. การคลายความเค้น (stress relaxation) อธิบายถึงการตอบสนองกับการเสีรูปลสุดท้ายเมื่อจานหมุนของเครื่องวัดความหนืดหมุนนี้หยุด การคลายความเค้นของยางเป็นการตอบสนองของทั้งอีลาสติก (elastic) และความหนืด (viscous) อัตราการคลายความเค้นช้าแสดงให้เห็นว่ามีส่วนของอีลาสติกมากกว่า ขณะที่อัตราการคลายความเค้นเร็วแสดงให้เห็นว่ามีส่วนของความหนืดมากกว่า อัตราการคลายความเค้นสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างโมเลกุล เช่น การกระจายน้ำหนักโมเลกุล กิ่งก้านของสายโซ่และปริมาณเจล โดยวัดเวลาที่ลดลงของทอร์คที่ 95% (T-95)

5. delta mooney โดยปกติทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นความหนืดสุดท้ายหลังจากผ่านไป 15 min ทำให้สะดวกในการแปรรูป

ลักษณะการสุกของยางธรรมชาติแปรปรวนมากเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น อายุของต้นยาง วิธีการจับตัวของยาง ค่า pH ปริมาณเนื้อยางแห้งและสารปรับของความหนืด มีการกำหนดสูตรยางมาตรฐานซึ่งได้รับการพัฒนาเพื่อให้สามารถใช้ในการประเมินผลเปรียบเทียบยางธรรมชาติที่แตกต่างกัน โดยสูตรยางธรรมชาติประกอบด้วย ยางธรรมชาติ 100 phr กรดสเตียริก 0.5 phr ซิงค์ออกไซด์ 6.0 phr ซัลเฟอร์ 3.5 phr MBT 0.5 phr สูตรยางนี้มีความไวต่อสารปนเปื้อนหรือวัสดุอื่นๆ เช่นกรดไขมัน เอมีน และกรดอะมิโน ซึ่งมีอิทธิพลต่ออัตราการวัลคาไนซ์

ยางธรรมชาติไวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพการผลิตของยางและสมบัติเชิงกลของยางที่ผสมสารเคมี สารแอนติออกซิแดนที่ป้องกันการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติ ซึ่งสามารถวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงความอ่อนตัวของยาง การทดสอบความอ่อนตัวรายงานค่า 2 ค่าคือ

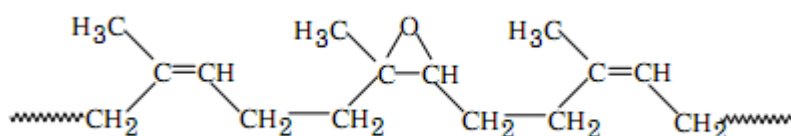
1. ความอ่อนตัวเริ่มต้น (plasticity, P_0) เป็นความอ่อนตัวเริ่มต้นและวัดจากการกดอัดชิ้นตัวอย่างหลังจากได้รับแรงตามเวลาที่กำหนด

2. ดัชนีความอ่อนตัว (plasticity retention index, PRI) วัดการคืนสภาพหลังจากที่ชิ้นตัวอย่างได้รับแรงกดอัด ความร้อนและหล่อเย็น %PRI หมายถึง $(P_{30}/P_0) \times 100$ เมื่อ P_0 คือความอ่อนตัวเริ่มต้นและ P_{30} คือความอ่อนตัวหลังจากอบ 30 min ที่อุณหภูมิ 140°C ในระหว่างการแปรรูปยางธรรมชาติที่มีค่า PRI ต่ำมีแนวโน้มเสีรูปรวดเร็วกว่ายางธรรมชาติที่มีค่า PRI สูง

2.4 ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (epoxidized natural rubber, ENR) (วันชาติ, 2552)

ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์เป็นอนุพันธ์ของยางธรรมชาติโดยมีการเติมหมู่อีพ็อกไซด์ลงไปบนสายโซ่พอลิเมอร์ โดยทั่วไปจะมีการเติมหมู่ดังกล่าวลงไปร้อยละ 25 หรือร้อยละ 50 โดย

เรียกว่า ENR25 และ ENR50 ตามลำดับ โดยยางทั้งสองมีค่าอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันประมาณ -45°C และ -20°C ตามลำดับ เนื่องจากมีการเติมหมู่อีพอกไซด์แบบสุ่ม ทำให้ยางที่ได้มีโครงสร้างแบบโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม ซึ่งสามารถตกผลึกได้ภายใต้ความเครียด (strain-induced crystallization) เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางธรรมชาติมีความเป็นขั้ว ซึ่งมีสูตรโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (เสาวนีย์, 2547)

2.4.1 ปฏิกริยาอีพอกซิเดชัน (เสาวนีย์, 2547)

การเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์จากปฏิกริยาอีพอกซิเดชันเริ่มต้นครั้งแรกในปี 1922 ปฏิกริยาอีพอกซิเดชันของยางธรรมชาติสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งในสภาวะน้ำยางและสารละลาย

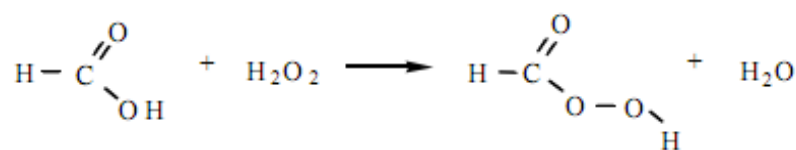
(i) ปฏิกริยาในสภาวะน้ำยาง สามารถเตรียมได้โดย

1. น้ำยางที่ใช้มีการปรับสภาพโครงสร้าง เพื่อให้อนุภาคของยางมีความเสถียรก่อน โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว ซึ่งสารลดแรงตึงผิวมีหลายประเภท คือ สารลดแรงตึงผิวที่เป็นประจุลบ (anionic surfactant) เช่น sodium alkyl sulfate และ sodium linear alkylbenzenesulfonate เป็นต้น สารลดแรงตึงผิวที่เป็นประจุบวก (cationic surfactant) เช่น alkyltrimethylammonium salts และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (non-ionic surfactant) เช่น พอลิเอทิลีนออกไซด์ เป็นต้น

2. เตรียมสารละลายกรดเปอร์ฟอร์มิก (peroxyformic acid) โดยการใช้กรดฟอร์มิก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำปฏิกริยากันเกิดกรดฟอร์มิกเปอร์ออกไซด์และน้ำ แสดงในรูปที่ 2.8 จากนั้นกรดฟอร์มิกเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการอีพอกซิเดชันอย่างรวดเร็วในโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่อิ่มตัว

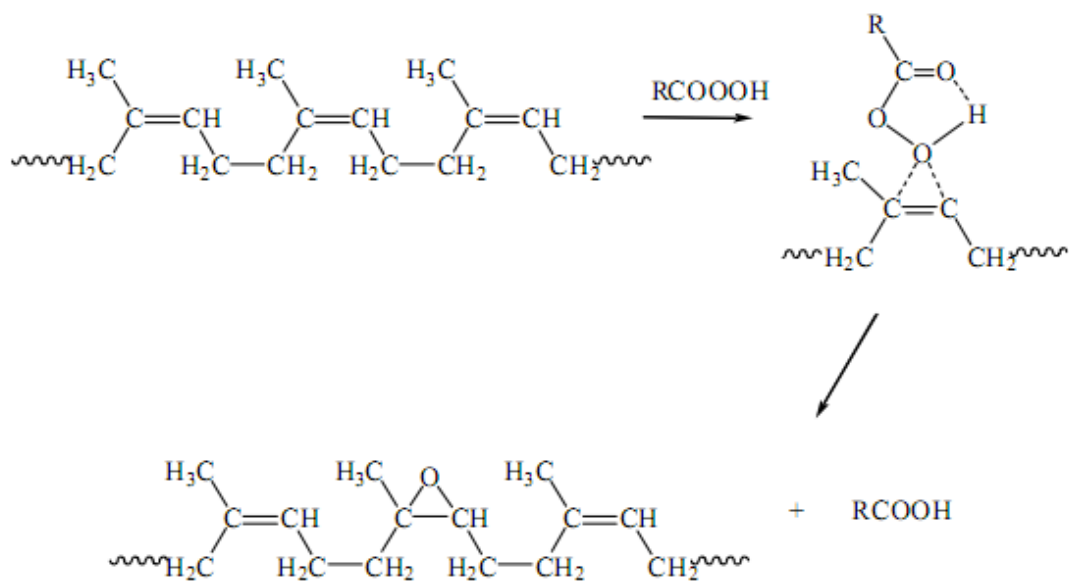
3. เติมสารละลายกรดฟอร์มิกเปอร์ออกไซด์ ในขณะที่ทำปฏิกริยาอีพอกซิเดชัน (in-situ performic epoxidation) โดยควบคุมสภาวะในการเตรียมอย่างระมัดระวัง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกริยาเปิดวงแหวนอีพอกไซด์ น้ำยางธรรมชาติที่นำมาใช้จะต้องนำมาทำให้มีความเสถียรต่อกรดเสียก่อน โดยการเติมสารช่วยเพิ่มความเสถียรที่ไม่มีประจุ (non-ionic surfactant) จากนั้นจึงนำมาทำปฏิกริยาอีพอกซิเดชันที่อุณหภูมิ $60-70^{\circ}\text{C}$ เกิดเป็นยาง

ธรรมชาติอีพ็อกซิ-ไดซ์ที่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ โดยกลไกปฏิกิริยาเริ่มจากออกซิเจนของเปอร์ออกไซด์เข้าไปจับตำแหน่งพันธะคู่ ทำให้เกิดสถานะแทรนซิชันไบไซคลิก (bicyclic transition state) หลังจากนั้นเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ได้โมเลกุลที่มีหมู่อีพ็อกไซด์ และได้กรดฟอร์มิกกลับคืนมาจากปฏิกิริยาการเกิดอีพ็อกซิเดชัน กลไกของปฏิกิริยาแสดงในรูปที่ 2.9



Formic acid Hydrogen Peroxide Peroxyformic acid

รูปที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยาของกรดฟอร์มิกเปอร์ออกไซด์ (เสาวนีย์, 2547)



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาอีพ็อกซิเดชันของยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (เสาวนีย์, 2547)

จากนั้นนำน้ำยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ที่ได้มาปรับสภาพให้เป็นกลาง จับตัวด้วยเมทา-นอล ล้างด้วยน้ำแล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C

(ii) ปฏิกิริยาในสภาวะสารละลาย ทำโดยการนำยางแห้ง หรือยางธรรมชาติเหลวทำให้เป็นสารละลายมาก่อน โดยการนำยางดังกล่าวมาละลายในตัวทำละลายโทลูอีน ต่อจากนั้นจึงเติมสารอีพ็อกซิไดซ์ลงในระบบ เช่น กรดเปอร์เบนโซอิก (perbenzoic acid) กรดเปอร์พาทาลิก

(perphthalic acid) กรดเปอร์แอซิติค (peracetic acid) หรือกรดฟอร์มิกเปอร์ออกซี (peroxyformic acid) โดยปฏิกิริยาเกิดเช่นเดียวกับในสถานะน้ำยาง

2.4.2 สมบัติของยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (เสาวนีย์, 2547)

ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์มีสมบัติขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่อีพ็อกไซด์ที่มีในโครงสร้าง มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ก็จะเกิดผลึกขณะได้รับแรงดึง และที่ระดับปริมาณของวงแหวนอีพ็อกไซด์ต่างกันจะมีผลทำให้ T_g แตกต่างกัน กล่าวคือเมื่อระดับการเกิดปฏิกิริยาอีพ็อกซิเดชันเพิ่มขึ้นทุกๆ 1 mol% จะทำให้ค่า T_g มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1°C ตัวอย่างเช่น ENR25 มีค่า T_g เท่ากับ -48°C ในขณะที่ ENR50 มี T_g เท่ากับ -23°C เป็นต้น

การทำให้ยางธรรมชาติมีหมู่อีพ็อกไซด์เพิ่มมากขึ้นทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเปลี่ยนแปลงดังนี้

- 1) T_g เพิ่มขึ้น
- 2) ยางหนักขึ้น มีความถ่วงจำเพาะ (specific gravity, SG) สูงขึ้น กล่าวคือ ENR25 มี SG = 0.97 ส่วน ENR50 มี SG = 1.03
- 3) ความทนต่อน้ำมัน (oil resistance) ของยางเพิ่มขึ้น สมบัติคล้ายยางคลอโรพรีน (chloroprene rubber, CR) และยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์มีความทนต่อน้ำมันคล้ายยางไนไตรล์ (butadiene acrylonitrile copolymer, NBR)
- 4) การซึมผ่านของก๊าซ (gas permeability) ต่ำลงคล้ายกับยางบิวไทล์ (butyl rubber, IIR)
- 5) ความมีขั้วของยางเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพ็อกไซด์ที่มีอยู่ในโครงสร้าง มีประโยชน์ในการใช้งานประเภทสารยึดติดหรือกาว (adhesives) และผลิตพอลิเมอร์ผสมกับพอลิเมอร์มีขั้ว เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์

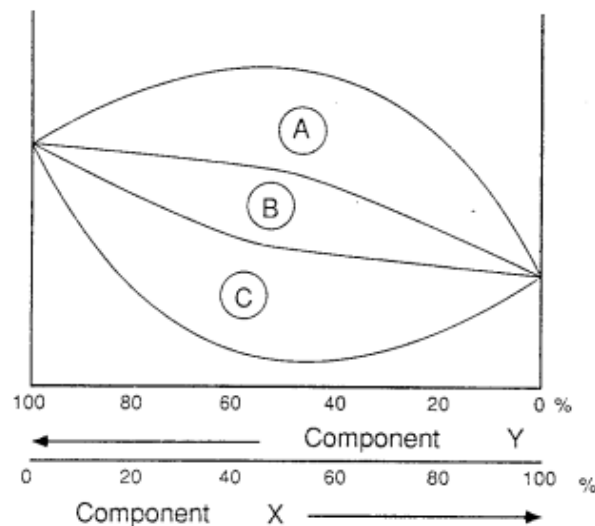
2.5 พอลิเมอร์ผสม (อรอุมา, 2548)

พอลิเมอร์ผสม คือพอลิเมอร์ 2 ชนิด หรือมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป ถูกนำมารวมกัน โดยวิธีทางกายภาพ ซึ่งส่วนมากจะปราศจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยวัตถุประสงค์ของการทำพอลิเมอร์ผสม คือปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้มีความหลากหลายมากขึ้น

สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะแตกต่างกันไป ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยขอบเขต A แสดงส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสมบัติที่เสริมกัน (synergism properties) จากพอลิเมอร์เดิม ขอบเขต B แสดงส่วนของพอลิเมอร์ที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกับสมบัติเดิม (simple properties)

ขอบเขต C แสดงส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสมบัติที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์เดิมเนื่องจากความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสมที่ขาดความเข้ากันในบางสมบัติเชิงกล (incompatible blend) จะมีสมบัติต่ำกว่าสมบัติเดิมของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยการเติมสารเติมแต่ง (additive) ที่เรียกว่า compatibilizer ลงไปช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างผิว (interfacial adhesion) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ (block copolymer) หรือกราฟท์โคพอลิเมอร์ (graft copolymer) ของพอลิเมอร์ที่ถูกนำมาผสมกัน

บางกรณีพบว่าเกิดการกราฟท์ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ เช่น การผสมพอลิเมอร์ด้วยวิธีการหลอมเข้าด้วยกัน (melt mixing) อาจทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ขาดออก (scission) เนื่องจากการสลายตัว ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีโอกาสเกิดการเชื่อมโยงระหว่างกันได้



รูปที่ 2.10 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ (อรอุมา, 2548)

2.5.1 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม (อาทิตา, 2549)

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ พอลิเมอร์ผสมที่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุล (miscible blend) และพอลิเมอร์ผสมแบบแยกเฟส (immiscible blend) โดยสมบัติของพอลิเมอร์ผสมแบบ miscible มักจะอยู่ระหว่างสมบัติของสารตั้งต้น เช่นค่า Tg ของพอลิเมอร์ผสมแบบ miscible จะอยู่ตรงกลางระหว่างค่า Tg เดิมของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมและสามารถทำนายค่าได้โดยกฎการผสม (rule of mixture) ดังสมการที่ 2.2

สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่มีโครงสร้างแบบแยกเฟสขึ้นกับโครงสร้างของพอลิเมอร์หลักในพอลิเมอร์ผสม หรือเป็นเฟสที่มีปริมาณมากกว่า ซึ่งตัวแปรหลักที่กำหนดว่า พอลิเมอร์ใดจะเป็นเฟสต่อเนื่อง (matrix) คือสัดส่วนในการผสมและสัดส่วนของความหนืด โดยทั่วไปพอลิเมอร์ตัวที่มีปริมาณมากกว่าจะมีโอกาสเกิดเป็นเฟสต่อเนื่องได้มากกว่า และพอลิเมอร์ชนิดที่มีความหนืดน้อยกว่า ก็มีโอกาสเป็นเฟสต่อเนื่องได้มากกว่าเช่นกัน

$$T_{bg} = \frac{T_{g1}W_1 + T_{g2}W_2}{W_1 + W_2} \quad (2.2)$$

- เมื่อ T_{bg} คือ อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของพอลิเมอร์ผสม
 T_{g1} คือ อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของพอลิเมอร์ตัวที่ 1
 T_{g2} คือ อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของพอลิเมอร์ตัวที่ 2
 W_1 คือ เศษส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ตัวที่ 1
 W_2 คือ เศษส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ตัวที่ 2

2.5.2 ปัจจัยที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสม (อรอุมา, 2548)

ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของส่วนประกอบที่นำมาผสมกันและเทคนิคที่ใช้ในการผสม

2.5.2.1 ปัจจัยทางธรรมชาติของส่วนประกอบ

1. อัตราส่วนความหนืด (viscosity ratio) คือ อัตราส่วนความหนืดของวัฏภาคกระจาย (dispersed phase) อยู่ในพอลิเมอร์ผสมซึ่งมักจะเป็นส่วนประกอบที่มีน้อยต่อความหนืดของวัฏภาคหลัก (matrix phase) ของพอลิเมอร์ผสมซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีมาก ดังสมการที่ 2.3 โดยพอลิเมอร์ผสมที่ความหนืดของวัฏภาคกระจายต่ำกว่าวัฏภาคหลักจะมีลักษณะทางกายภาพของวัฏภาคกระจายที่ละเอียด และการกระจายของวัฏภาคกระจายจะมีความสม่ำเสมอในทางตรงกันข้าม ถ้าวัฏภาคกระจายมีความหนืดสูงกว่าวัฏภาคหลัก การกระจายของวัฏภาคกระจายในพอลิเมอร์ผสมจะค่อนข้างหยาบ หรือหากพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความหนืดของพอลิเมอร์ผสมจะพบว่า ถ้าค่าอัตราส่วนความหนืดของพอลิเมอร์ผสมต่ำ อนุภาคที่กระจายจะมีขนาดเล็ก และถ้าอัตราส่วนความหนืดของพอลิเมอร์ผสมสูง อนุภาคที่กระจายจะมีขนาดใหญ่

$$\text{viscosity ratio} = \frac{\text{dispersed phase}}{\text{matrix phase}} \quad (2.3)$$

2. องค์ประกอบ (composition) การเพิ่มสัดส่วนของวัฏภาคกระจายจะทำให้ขนาดอนุภาค (particle) เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเข้าร่วมตัวกันของอนุภาคที่กระจาย อย่างไรก็ตาม ความตึงผิว (interfacial tension) ของคู่พอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน จะมีผลต่อการเข้าร่วมตัวกันของวัฏภาคดังกล่าว คือหากค่าความตึงผิวต่ำจะสามารถลดการเข้าร่วมตัวกันของอนุภาคกระจายได้

3. ความยืดหยุ่น (elasticity) เนื่องจากความเป็น viscoelastic ของส่วนประกอบในพอลิเมอร์ผสม สามารถส่งผลต่อลักษณะการไหลของพอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการผสมได้ พอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงจึงมักกลับคืนรูปเดิมได้ง่าย จึงทำให้ความยืดหยุ่นสามารถส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของวัฏภาคกระจายได้

2.5.2.2 ปัจจัยจากเทคนิคที่ใช้ในการผสม

เทคนิคที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์มีหลายเทคนิคดังนี้

1. การผสมภายใต้แรงเชิงกล (mechanical blending) เป็นวิธีการผสมพอลิเมอร์ผ่านเครื่องมือ เช่น เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) เครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และเครื่องอัดรีด (extruder) ซึ่งการแตกตัวของวัฏภาคกระจายจะค่อนข้างหยาบ อย่างไรก็ตาม สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะขึ้นอยู่กับ ความเร็ว เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการผสม

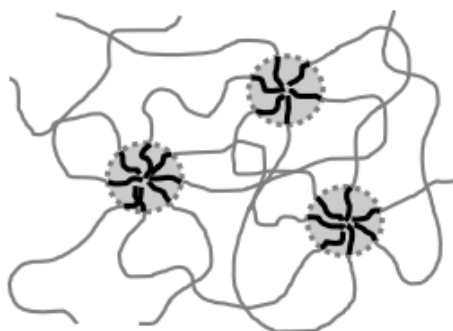
2. การผสมในสภาวะการละลาย (solution blending) เป็นการผสมที่ต้องอาศัยการละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย โดยการละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย (solvent) แล้วนำสารละลายที่ได้ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมาผสมกัน จากนั้นทำการระเหยตัวทำละลายออกไป ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์และการแยกตัวทำละลายออกจากพอลิเมอร์ผสมที่ได้

3. การผสมผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) พอลิเมอร์จะถูกผสมภายใต้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (emulsion) ในระบบที่มีองค์ประกอบของมอนอเมอร์ (monomer) อิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) และตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ที่ละลายได้ในตัวกลาง วิธีนี้การกระจายตัวและแตกตัวของวัฏภาคกระจายจะค่อนข้างดี

อย่างไรก็ตามแต่ละเทคนิคที่ใช้ในการผสมนั้น การเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับ การได้รับแรงเค้นเฉือน (shear stress) ที่ได้รับในระหว่างการผสมด้วย โดยเมื่อพอลิเมอร์ที่ได้รับแรงเฉือนในระหว่างการผสมสูง อนุภาคของวัฏภาคกระจายจะเล็กลง

2.6 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomer, TPE) (ภาสรี, 2546)

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ได้มาจากการรวมกันของคำสองคำ คือ คำว่า “thermoplastic (เทอร์โมพลาสติก)” และคำว่า “elastomer (ยาง)” ความหมายของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ คือ พอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปได้เหมือนพลาสติก โดยยังคงมีสมบัติเหมือนยาง (rubber หรือ elastomer) ที่อุณหภูมิใช้งาน (usage temperature)



รูปที่ 2.11 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ประกอบด้วยส่วนที่แข็ง (สีดำ) และส่วนที่นิ่ม (สีเทา) (นเรนทร์, 2550)

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่แข็ง (hard domain) และส่วนที่นิ่ม (soft domain) โดยลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติก-อีลาสโตเมอร์ แสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งองค์ประกอบทั้งสองส่วนมีหน้าที่สำคัญ ดังนี้

1. ส่วนที่แข็ง (hard domain) ทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ไหลได้อย่างพลาสติกเมื่อให้อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของพลาสติก เมื่อลดอุณหภูมิลง ส่วนที่แข็งจะแข็งตัว ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีสมบัติที่ดีเมื่อนำไปใช้งาน

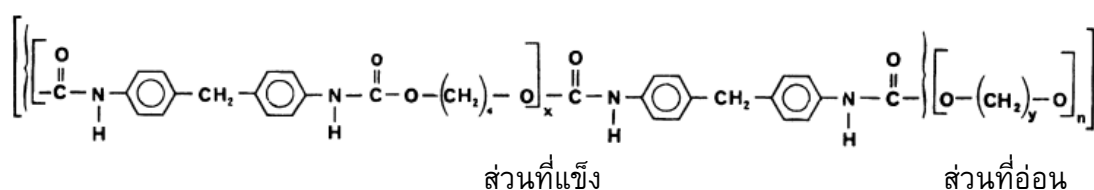
2. ส่วนที่นิ่ม (soft domain) จะส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีสมบัติที่ยืดหยุ่น และความสามารถในการคืนรูปร่างเดิมได้เหมือนยางเมื่อนำเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ไปใช้งาน

2.6.1 ชนิดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Costa *et al.*, 2008)

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ทำมาจากบล็อกโคพอลิเมอร์ (block copolymer) และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์สองชนิด (polymer blends)

1. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ทำมาจากบล็อกโคพอลิเมอร์

1.1 เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic polyurethane elastomer, TPU) สามารถผลิตได้โดยการทำปฏิกิริยากันของไดไอโซไซยาเนต (diisocyanate) เช่น มีเทนไดไอโซไซยาเนต (methane diisocyanate, MDI) หรือโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (toluene diisocyanate, TDI) กับไดออลสายโซ่ยาว (long chain diols) เช่น พอลิเอสเทอร์เหลว (liquid polyester) หรือพอลิอีเทอร์พอลิออล (polyether polyols) และเติมเซนเอ็กเทนเดอร์ (chain extender) ลงไป เช่น 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butane diol) ซึ่งไดไอโซไซยาเนตและเซนเอ็กเทนเดอร์ทำหน้าที่เป็นส่วนที่แข็ง และไดออลสายโซ่ยาวทำหน้าที่เป็นส่วนที่นิ่มและยืดหยุ่น (Harper, 2543) ซึ่งแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.12 คุณสมบัติการใช้งานของ TPU ประมาณ -51°C ถึง 135°C และมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 70 Shore A ถึง 75 Shore A ชื่อทางการค้าของ TPU เช่น Elastollan[®]ผลิตโดย BASF

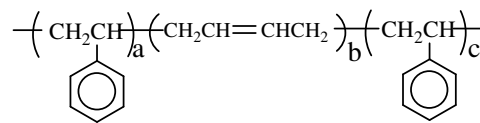


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (Abraham และ McMahan, 2004)

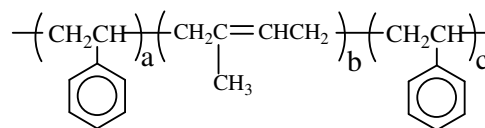
สมบัติเด่นของ TPU คือ ทนต่อการขีดถูและทนต่อการฉีกขาดได้ดีมาก จึงเหมาะสำหรับทำพื้นรองเท้าและปลอกสายหุ้มเคเบิล มีความทนน้ำมันและตัวทำละลายได้ดี เมื่อนำไปผลิตเป็นฟิล์มหรือแผ่นจะมีสมบัติที่ดีมาก เพราะทนการขีดถู มีความเหนียว และยืดหยุ่น รวมทั้งทนต่อการฉีกขาดและการเจาะทะลุได้ดีมาก มีความยืดหยุ่น ทนต่อการหักงอ และ ทนแรงกระแทกแม้อยู่ในอุณหภูมิต่ำ เหมาะสำหรับใช้ทำรองเท้าสกี (ภาสรี, 2548)

1.2 เทอร์โมพลาสติกพอลิเอไมด์อีลาสโตเมอร์ (thermoplastic polyamide elastomer) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มที่มีสองโครงสร้าง คือ พอลิอีเทอร์เอสเทอร์เอไมด์-บล็อกโคพอลิเมอร์ (polyetheresteramide block copolymer, PEBA) ซึ่งแสดงโครงสร้างโมเลกุลในรูปที่ 2.13 ส่วนของพอลิเอสเทอร์ทำหน้าที่เป็นส่วนที่นิ่มและส่วนของพอลิอีเทอร์ทำหน้าที่เป็นส่วนที่แข็ง สมบัติเชิงกายภาพของ PEBA ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของส่วนที่แข็งและส่วนที่นิ่ม นั่นคือ ส่วนที่แข็งจะควบคุมจุดหลอมเหลวและความแข็งแรงเชิงกล ขณะที่ส่วนที่นิ่มจะควบคุมความต้านทานต่อสารเคมีและตัวทำละลาย ความเสถียรทางความร้อน และความยืดหยุ่น ณ อุณหภูมิต่ำ (Harper, 2000) เทอร์โม-

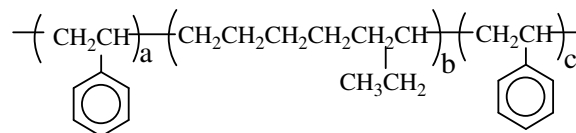
โมเลกุลทั้งโมเลกุล เมื่อไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงขึ้นเกินค่า T_g ของพอลิสไตรีนหรือพอลิเมออร์ที่ทำหน้าที่เป็นส่วนที่แข็ง เมื่อนั้นโมเลกุลต่างๆ ก็สามารถที่จะผ่านเคลื่อนกันได้โดยไม่ถูกยึดติดไว้ คล้ายกับรูปแบบการเชื่อมโยงของยางที่วัลคาไนซ์ แต่จะแตกต่างกันตรงที่เมื่อไทรบลิคโคพอลิเมอร์ ประเภทนี้ได้รับความร้อนอย่างเพียงพอจะทำให้ส่วนที่แข็ง (พอลิสไตรีน) เกิดการไหลได้ แต่เมื่อไรก็ตามที่อุณหภูมิลดต่ำกว่าอุณหภูมิ T_g ของพอลิไดอินจะเกิดการแยกเฟสอีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้สมบัติการยืดหยุ่นของยางกลับคืนมา



SBS



SIS

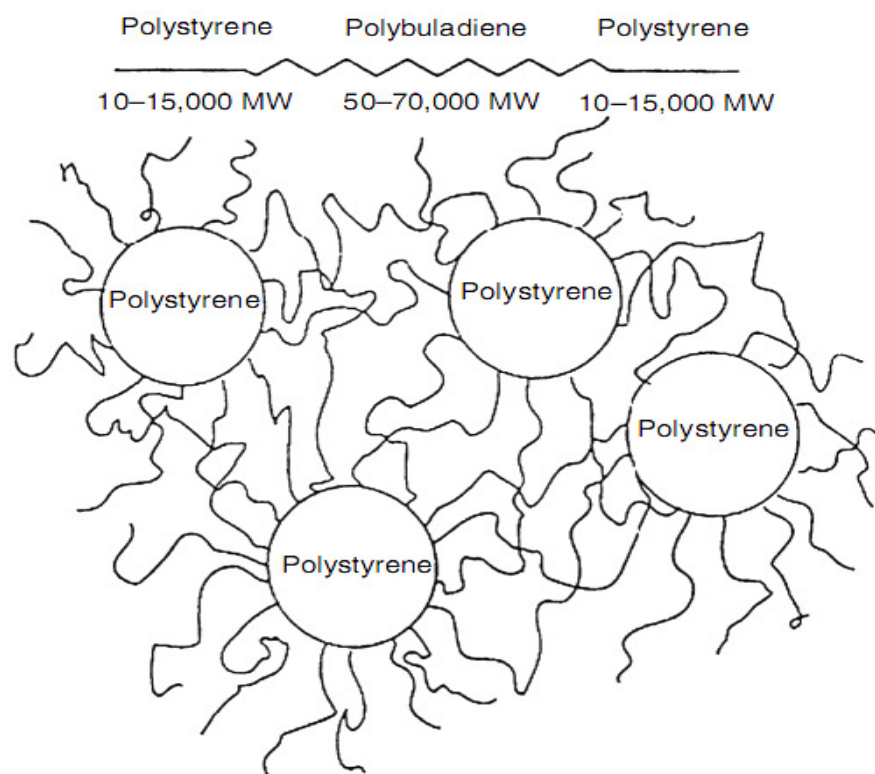


SEBS

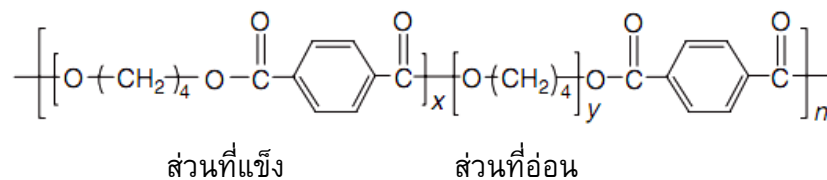
รูปที่ 2.14 โครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกพอลิสไตรีนไดอินอีลาสโตเมอร์ชนิดต่างๆ (Harper, 2000)

1.4 เทอร์โมพลาสติกโคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (thermoplastic copolyester elastomer, COPEs) เป็นพอลิเมออร์ร่วมแบบบล็อก ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่แข็งและส่วนที่นิ่ม โดยส่วนที่แข็งประกอบด้วยเอสเทอร์สายโซ่สั้น (short chain ester block) เช่น เตตระเมทิลีนเทอเรพทาเลท (tetramethylene terephthalate) และส่วนที่นิ่มประกอบด้วย อะลิฟาติกพอลิอีเทอร์ (aliphatic polyether) หรืออะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ไกลคอล (aliphatic polyester glycol) หรือเรียกโคพอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า เทอร์โมพลาสติกอีเทอร์เอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (thermoplastic etherester elastomers, TEEs) ซึ่งแสดงโครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ชนิดนี้ในรูปที่ 2.16 ชื่อทางการค้าของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ชนิดนี้ เช่น Hytrel[®] ผลิตโดยบริษัท Dupont

ข้อดีของ COPEs คือ ทนทานต่อความร้อนและสารเคมีได้ดีเยี่ยม ด้านทานต่อ-แรงดึงและทนต่อการฉีกขาดได้ดีมาก ทนทานต่อการหักพับ ทนน้ำมัน น้ำมันเครื่อง ตัวทำละลาย และแอลกอฮอล์ได้ดี เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องทนความร้อนและสารเคมี และต้องการสมบัติเชิงกลสูง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติต่างๆ ที่ดีเยี่ยม คือ มีความเหนียว ทนทานต่อแรงกระแทก ความสามารถในการรับน้ำหนักได้สูง มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ เหมาะแก่การใช้งานที่ต้องเคลื่อนไหวขณะใช้งาน ตัวอย่างเช่น ฝาครอบถุงลมจักรยาน (ภาสรี, 2548)



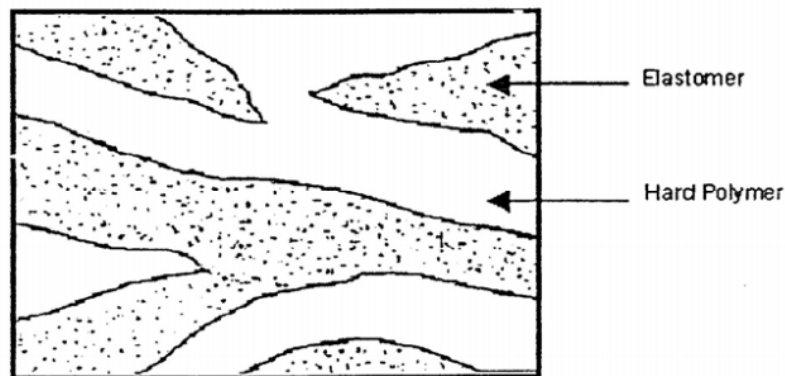
รูปที่ 2.15 สัณฐานวิทยาของบล็อกโคพอลิเมอร์ของสไตรีนบิวทาไดอีนสไตรีน (Costa *et al.*, 2008)



รูปที่ 2.16 โครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Costa *et al.*, 2008)

2. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์สองชนิด

2.1 เทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic polyolefin elastomer, TPO) เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกชนิดพอลิโอเลฟิน เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) หรือพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) และยางที่ไม่วัลคาไนซ์ เช่น ยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ โดยการผสมในเครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูงๆ เช่น เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ทำให้สัณฐานวิทยาที่ได้เป็นระบบสองเฟส คือ มีเฟสของพอลิโอเลฟินและเฟสของยาง สัณฐานวิทยาส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างแบบเฟสต่อเนื่องร่วม (co-continuous phase) แสดงในรูปที่ 2.17 เฟสของยางจะไม่เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล พอลิเมอร์ที่ได้จะมีความแข็งแรงจากเฟสของพลาสติกและมีความยืดหยุ่นจากเฟสของยาง เนื่องจากทั้งสองเฟสไม่ได้เกิดการเชื่อมโยงกัน จึงสามารถเกิดการไหลได้อย่างพลาสติก TPO มีสมบัติตั้งแต่ค่อนข้างอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่นคล้ายยางจนถึงค่อนข้างแข็งเหมือนพลาสติกทั่วไป ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของยางและพลาสติกที่ใช้ในการผสม สมบัติของ TPO จะดีหรือไม่ดีขึ้นอยู่กับชนิดของยางและพลาสติก รวมทั้งการผสมพลาสติกและยางเข้าด้วยกัน ชื่อทางการค้าของ TPO เช่น Engage[®] ผลิตโดยบริษัท DuPont Dow Elastomers โดยเรียกว่า พอลิโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ (polyolefin elastomer, POE) ที่มียางชนิดเอทิลีนออกทีน (ethylene octene copolymer elastomer) เป็นส่วนประกอบ

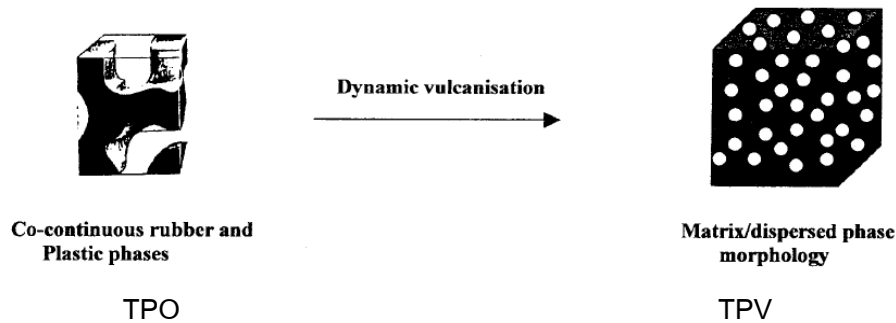


รูปที่ 2.17 สัณฐานวิทยาแบบเฟสต่อเนื่องร่วมของ TPO (Holden, 2000)

2.2 เทอร์โมพลาสติกเชื่อมโยง (thermoplastic vulcanisate, TPV) TPV ประกอบด้วยยางวัลคาไนซ์ เช่น ยางอีพดีเอ็ม ยางไนไตรล์ และยางบิวไทล์ กับเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน TPV มีความแตกต่างกับ TPO คือ TPV จะต้องมีการกระบวนการที่เรียกว่า ไดนามิกส์วัลคาไนเซชัน (dynamic vulcanization) กระบวนการ

ไดนามิกส์วัลคาไนเซชันเป็นกระบวนการที่ทำให้ยางสุกในขณะที่กำลังผสมกับพลาสติกในเครื่องผสมด้วยแรงเฉือนสูงๆ ซึ่งทำให้ยังคงมีความสามารถในการขึ้นรูปได้เหมือนพลาสติก และทำให้ยางซึ่งเป็นเฟสกระจายเกิดการเชื่อมโยงในเฟสของพลาสติก รูปที่ 2.18 แสดงความแตกต่างของสัณฐานวิทยาาระหว่าง TPO กับ TPV

กระบวนการไดนามิกส์วัลคาไนเซชันสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกายภาพได้ เช่น มีสมบัติการทนต่อแรงดึงดีขึ้น ต้านทานต่อความล้า ทนต่อน้ำมัน และปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะให้ดีขึ้น (Mehrabzadeh and Delfan, 2000) ชื่อทางการค้าของ TPV เช่น Santoprene[®] ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีนกับยางอีพีดีเอ็ม Geolast[®] ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีนกับยางไนไตรล์ และ Trefisin[®] ประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนกับยางบิวไทล์

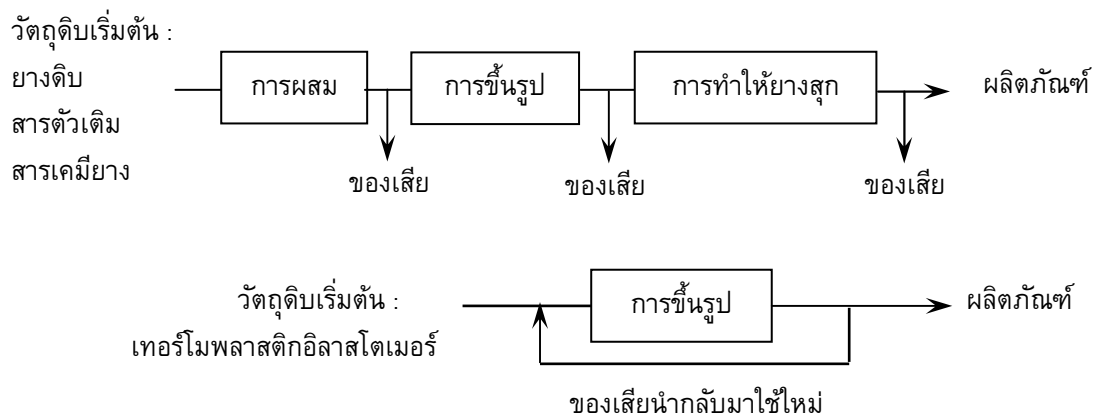


รูปที่ 2.18 ความแตกต่างของสัณฐานวิทยาาระหว่าง TPO กับ TPV (John *et al.*, 2003)

2.6.2 ข้อดีของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (ภาสรี, 2548)

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีข้อดีกว่ายางเชื่อมโยง คือ ขึ้นรูปได้ง่าย โดยใช้เทคนิคเดียวกับเทอร์โมพลาสติก ใช้สารเติมแต่งใส่ในพอลิเมอร์ไม่มาก ใช้เวลาในการผสมสั้น สามารถนำเศษหรือของเสีย (scrap) กลับมาใช้ใหม่ได้โดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียและมีสมบัติคงเดิม พลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูปต่ำ สามารถควบคุมรูปร่างให้เป็นไปตามความต้องการได้ง่ายและมีน้ำหนักเบากว่ายางเชื่อมโยงที่มีปริมาตรเท่ากัน สามารถเปรียบเทียบการขึ้นรูปของยางและเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ได้ในรูปที่ 2.19 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากยางทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ กระบวนการเริ่มต้นจากการผสมสูตรยาง ซึ่งประกอบด้วยยางและสารเคมียาง เช่น สารตัวเติม (filler) และสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) เป็นต้น จากนั้นทำการขึ้นรูปให้เป็นชิ้นงานตามต้องการ แล้วตามด้วยกระบวนการทำให้ยางสุก (vulcanization process) เพื่อให้ยางคงรูปและมีสมบัติที่ดีตามที่ต้องการ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนของการขึ้นรูปจะมีของเสียเกิดขึ้น ซึ่งไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

แต่เมื่อเลือกใช้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการขึ้นรูปจะเหมือนกับกระบวนการขึ้นรูปของพลาสติก คือ เริ่มจากการทำให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์หลอมเหลวและไหลได้ แล้วทำการขึ้นรูปให้เป็นรูปร่างตามที่ต้องการ ซึ่งถ้ามีของเสียเกิดขึ้นก็สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ทั้งไม่ต้องมีขั้นตอนในการทำให้ยางสุก ซึ่งในขั้นตอนนี้อาจเป็นอย่างไร้ และขาดไม่ได้สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง นอกจากนี้เมื่อนำไปใช้งาน ผลิตภัณฑ์ก็ยังมีสมบัติคล้ายยางมากจนแทบแยกกันไม่ออกว่าทำมาจากยางหรือเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีสีสนสวยงาม และไม่มีกลิ่นของสารเคมียาง



รูปที่ 2.19 การขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากยางและเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Arnold and Rader, 2002)

2.7 การตรวจสอบเอกสาร

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับ PBAT ผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

2.8.1.1 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ PLA

Gu และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBAT ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ พบว่าพอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยมี PBAT กระจายอยู่บนเมทริกซ์ PLA และมอดูลัสสะสม (storage modulus) ของพอลิเมอร์ผสมมากขึ้นตามปริมาณ PBAT ที่เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณ PBAT ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลกับมอดูลัสสูญเสีย (loss modulus) ของพอลิเมอร์ผสมที่ทุก ๆ ความถี่ มอดูลัสการคลายตัว (relaxation modulus) ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PBAT ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันการเติม

PBAT ทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้นและลดพลังงานกระตุ้นการไหล นอกจากนี้ PBAT ยังทำให้ดัชนีการไหลลดลง ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มแบบ shear-thinning ของพอลิเมอร์ผสม

Signori และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสลายตัวของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBAT ภายใต้การขึ้นรูปด้วยการหลอมด้วยเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 150–200°C อัตราเร็วรอบในการผสม 50 rpm เวลาในการผสม 10 min พบว่า ที่อัตราส่วน PLA 75 wt% กับ PBAT 25 wt% ช่วงอุณหภูมิ 150–200°C PLA บริสุทธิ์เกิดการสลายตัว ส่วน PBAT บริสุทธิ์ไม่เกิดการสลายตัว แต่เมื่อนำ PLA มาผสมกับ PBAT พบว่าเกิดการสลายตัวน้อยกว่า PLA บริสุทธิ์ และพอลิเมอร์ผสมถูกปรับปรุงสมบัติให้ความเหนียวเพิ่มขึ้นมากกว่า PLA บริสุทธิ์

Xiao และคณะ (2009) ศึกษาพฤติกรรมที่เกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBAT โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด จากการศึกษาพบว่าอัตราการเกิดผลึกของ PLA เพิ่มขึ้น ยกเว้นพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PBAT 60% การเปลี่ยนแปลงของอัตราการเกิดผลึกเกิดจาก 2 ปัจจัยคือ การเปลี่ยนแปลงของ T_m และการลดลงของ T_g สำหรับกลไกการเกิดผลึกพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง และโครงสร้างผลึกของ PLA ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากการผสม

Yeh และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้และสมบัติของผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBAT เตรียมด้วยการผสมแบบหลอม จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริมิทรี (differential scanning calorimetry, DSC), เทคนิค การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (wide-angle x-ray diffraction, WAXD) และเทคนิคทางกลศาสตร์เชิงพลศาสตร์ (dynamic mechanical analysis, DMA) พบปริมาณผลึกของ PLA และ/หรือ PBAT ในปริมาณเล็กน้อยในชิ้นตัวอย่าง จากการศึกษา DSC พบว่า T_g ของ PLA มีค่าต่ำที่สุดเมื่อมีปริมาณ PBAT 2.5 wt% และจากการศึกษาลักษณะฐานวิทยาและ DMA พบว่า PBAT เข้ากันได้ดีกับ PLA ที่ปริมาณ PBAT น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.5 wt% เนื่องจากการแยกเฟสที่ชัดเจนของ PBAT ที่ปริมาณ PBAT มากกว่า 2.5 wt% เกิดการแยกเฟสของ PBAT การผสม PLA กับ PBAT โดยมี PBAT ในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยปรับปรุงพฤติกรรมการเสียรูปแบบเปราะของ PLA

Zhao และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBAT ที่ปริมาณของ PBAT 5–20 wt% ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ที่อุณหภูมิ 150–180°C และความเร็วยกตัว 150 rpm พบว่า พอลิเมอร์ผสมสามารถผสมเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันที่ปริมาณ PBAT 5–20 wt% และช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลบางค่า คือ ระยะเวลายืด ๓ จุดขาดและความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกัน ค่ามอดุลัส (modulus) และความต้านทานต่อแรงดึง (tensile

strength) ลดลงเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น ในด้านสมบัติทางความร้อนพบว่า เมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นด้วย ผลงานวิจัยนี้สอดคล้องกับการทดลองที่ใช้พอลิเอสเตอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ได้แก่ PBA และ PBS

Farsetti และคณะ (2011) ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBAT โดยแปรปริมาณ PBAT ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว จากการศึกษาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและการทนต่อแรงกระแทก (impact strength) พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีค่ามอดูลัสและความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณเพียงเล็กน้อยของ PBAT ช่วยปรับปรุงระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) และการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (dynamic mechanical thermal analysis, DMTA) พบว่า Tg ของ PLA ไม่ได้รับอิทธิพลจากการผสมกับ PBAT แสดงว่า PBAT เข้ากันไม่ได้กับ PLA และจากการทดสอบ DSC พบ Tm สองค่าซึ่งเป็นของ PLA และ PBAT

Li และคณะ (2011) ศึกษาพฤติกรรมการไหลและลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBAT โดยทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จากการทดลองพบว่า แนวโน้ม shear-thinning ของพอลิเมอร์ผสมแข็งแรงขึ้นเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น ที่ความถี่ต่ำพบว่า ความหนืดเชิงซ้อน (complex viscosity) มอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียของพอลิเมอร์ผสมที่มี PBAT 20 wt% มีค่ามากกว่าชั้นตัวอย่างอื่นที่มีปริมาณ PBAT น้อยกว่า 50 wt% จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) พบว่าที่ปริมาณ PBAT 5 – 50 wt% พบอนุภาคทรงกลม เป็นเส้นยาว (elongated fibrous) และเป็นเฟสร่วม (co-continuous) เมื่อปริมาณ PBAT มากกว่า 70 wt% กลับมาเป็นอนุภาคทรงกลมอีกครั้ง ซึ่งอนุภาคทรงกลมนี้เป็นของ PLA กระจายใน PBAT เมทริกซ์

Lee และคณะ (2007) ได้ศึกษาอิทธิพลของการฉายรังสีอัลตราซาวด์ (ultrasound) บนพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBAT โดยทำการผสมที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 (PBAT50) เนื่องจากในอัตราส่วนนี้พอลิเมอร์ผสมไม่เข้ากัน ทำการฉายรังสีอัลตราซาวด์ขณะที่ทำการผสมแบบหลอม จากการทดสอบพบว่า ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับรังสีอัลตราซาวด์ ลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมขึ้นกับระยะเวลาในการฉายรังสี สำหรับ PBAT50 พบว่า PBAT มีการลดขนาดมากที่สุดเมื่อได้รับรังสีเป็นเวลา 30 sec และเมื่อฉายรังสีมากกว่า 30 sec ทำให้ PBAT กลับมารวมตัวกันใหม่ (flocculation) จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงพบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น เมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับการฉายรังสีในระยะเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากเกิดการยึดติดกันระหว่าง PLA กับ PBAT ดีกว่าและการกระจายตัวของ PBAT ดีกว่า การทดสอบการทนต่อแรงกระแทกพบว่า

พอลิเมอร์ผสมสามารถทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นและสามารถทนต่อแรงกระแทกได้มากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้รับรังสี

2.8.1.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT PLA และ GMA

Zhang และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการเตรียมและสมบัติของ PLA ผสม PBAT โดยใช้ไกลซิโดวเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate, GMA) เป็นสารช่วยให้เกิดปฏิกิริยาในระหว่างการผสมโดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานแรงกระแทก พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เติม GMA มีสมบัติดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติม GMA และผลจาก SEM พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม GMA มีการเข้ากันได้ดีกว่า จากการศึกษสมบัติทางความร้อนพบว่า อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature) ของพอลิเมอร์ผสมที่เติม GMA มีค่าสูงกว่า แต่จุดหลอมเหลวมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติม GMA มอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญหายของพอลิเมอร์ผสมที่เติม GMA มีค่าสูงกว่า พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติม GMA ในส่วนของพฤติกรรมการไหลพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เติม GMA มีความหนืดมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติม GMA โดยปริมาณ GMA มากขึ้น ความหนืดก็สูงขึ้นด้วยเนื่องจากขนาดโมเลกุลของ GMA ที่เติมเข้าไป ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมที่เติม GMA ให้สมบัติส่วนใหญ่ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติม GMA

Kumar และคณะ (2010) ศึกษาอิทธิพลของ GMA ต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและลักษณะฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBAT เตรียมด้วยการผสมแบบหลอม ใช้ GMA เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ เพื่อปรับปรุงพื้นผิวระหว่าง PLA กับ PBAT จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า ความต้านทานต่อแรงกระแทกและความต้านทานต่อแรงดึงของ PLA เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น อัตราส่วน PLA:PBAT ที่ 75:25 มีความต้านทานต่อแรงกระแทกมากที่สุด นอกจากนี้การเติม GMA 3 – 5% เพิ่มความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม และการเติมดินเหนียวนาโน (nanoclay) เพิ่มค่ามอดูลัสจาก 1,841.40 MPa เป็น 2,106.66 MPa จาก SEM พบการกระจายของ PBAT ใน PLA เมทริกซ์ที่มีการเติม GMA ซึ่งมีการปรับปรุงการยึดติดระหว่าง PLA กับ PBAT เมื่อเติม GMA และดินเหนียวนาโน จาก XRD แสดงให้เห็นว่า d-spacing ระหว่าง PLA, PBAT และดินเหนียวนาโน เพิ่มขึ้น จาก DSC และ TGA แสดงให้เห็นว่ามีการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA บริสุทธิ์

2.8.1.3 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT PLA และ plasticizer

Coltelli และคณะ (2008) ทำการปรับปรุงสมบัติของ PLA โดยเติมทั้งอะซีทิลไตรบิวทิลซิเตรต (acetyl tributyl citrate, ATBC) ซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำและ PBAT

เพื่อปรับปรุงความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมในเครื่องผสมแบบปิด จากการศึกษาพบว่า มอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุงอยู่ในช่วง 100 – 300 MPa และระยะยืด ณ จุดขาดอยู่ในช่วง 10 – 300% การเติม ATBC ลงใน PLA/PBAT ทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นมากกว่า 150% และพบว่า ATBC ละลายใน PBAT มากกว่า PLA

2.8.1.4 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT PLA และ compatibilizer

2.8.1.5 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และแป้ง

Ren และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic starch, TPS), PLA และ PBAT โดยผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ซึ่งปริมาณของ TPS คงที่ที่ 50 wt% และส่วนที่เหลือเป็นส่วนของ PLA และ PBAT และทำการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) เพื่อปรับปรุงผิวของ TPS ให้คล้ายคลึงกับพอลิเอสเทอร์ พบว่าการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้เพียงเล็กน้อยจะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม โดยระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมมากขึ้นตามปริมาณ PBAT ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ พอลิ-เมอร์ผสมที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้มีลักษณะฐานวิทยาศาสตร์ที่แสดงให้เห็นอนุภาค TPS ที่ถูกห่อหุ้มและกระจายตัวดีบนพอลิเอสเทอร์ และพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้มีการดูดซึมน้ำมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้

Raquez และคณะ (2008) ทำการเตรียมแป้ง (talc) ผสมกับ PBAT โดยทำการกราฟท์มาลิก แอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MA) บน PBAT เพื่อปรับปรุงการยึดติดกันระหว่าง PBAT กับแป้ง จากนั้นนำมาผสมแบบหลอมกับแป้งและเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ซึ่งในระหว่างการผสมจะเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง MA ที่กราฟท์อยู่บน PBAT กับหมู่ซิลานอล (silanol group) ที่อยู่บนผิวแป้ง จากการศึกษาด้วย SEM พบว่าการยึดติดระหว่างผิวของ MA-g-PBAT กับแป้งได้รับการปรับปรุง จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า MA-g-PBAT/Talc ที่มีปริมาณแป้ง 60 wt% มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด

Mani และ Bhattacharya (2001) ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วย PCL, PBS และ PBAT ปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างแป้งกับพอลิเอสเทอร์ด้วยสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ประกอบด้วยหมู่แอนไฮไดรด์ ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ แปรปริมาณแป้ง 10 -70% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่า การเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณเพียงเล็กน้อยช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ผสมมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่

เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้มีความต้านทานต่อแรงดึงคงที่ แต่พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้มีความต้านทานต่อแรงดึงลดลงตามปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้น แป้งผสม PBAT ดูดซับน้ำได้มากกว่าพอลิเอสเตอร์ ชนิดอื่น สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้มี Tg ของแป้งต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้

Olivato และคณะ (2011) ศึกษาความเข้ากันได้ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้ง (starch) กับ PBAT โดยเติมมาลิกิกแอซิดไฮโดรด์และกรดซิตริก (citric acid, CA) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ เติมปริมาณ 2% w/w ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับ PBAT (55/45) จากการทดสอบพบว่า การเติม CA และ MA ในพอลิเมอร์ผสมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลและโครงสร้างของฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเติม 2.0% CA แต่ฟิล์มที่เติม MA 2.0% พบว่าพอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ไม่ดีและมีความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดน้อย แสดงให้เห็นว่า CA เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีประสิทธิภาพทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างแป้งและ PBAT ซึ่งช่วยเพิ่มแรงกระทำระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ ทำให้ฟิล์มมีความต้านทานต่อแรงดึงมากขึ้น และไอน้ำสามารถซึมผ่านได้น้อยลงเมื่อเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้

Averous และ Fringant (2001) ศึกษาอิทธิพลของพลาสติกไซเซอร์ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับพอลิเอสเตอร์ชนิดต่างๆ พอลิเอสเตอร์ย่อยสลายทางชีวภาพที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย PCL พอลิเอสเตอร์ เตไรม์ (polyester amide, PEA) PBSA และ PBAT ทำการผสม TPS และพอลิเอสเตอร์ด้วยการผสมแบบหลอม จากการศึกษพบว่า การเติมพอลิเอสเตอร์ใน TPS ช่วยเพิ่มความคงรูปหลังการฉีด จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระทำ ระยะยืด ณ จุดขาดและ SEM ซึ่งแสดงความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง พบว่า PBAT และ PEA เข้ากับ TPS ได้ดีกว่า PCL และ PBSA ที่ปริมาณพอลิเอสเตอร์ 10% พบว่าพฤติกรรมไม่ชอบน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลงอย่างมาก

Raquez และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้ระหว่าง TPS กับ PBAT โดยมีการเติม MA เป็นสาร reactive extrusion ในขั้นตอนแรกเตรียม MTPS โดยนำแป้งผสมกับ กลีเซอรอล (glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ และ MA (esterification agent) จากนั้นนำมาผสมกับ PBAT พบว่าที่ปริมาณ PBAT 60 – 70 wt% ของ PBAT-g-MTPS เกิดปฏิกิริยาทรานส์-เอสเตอร์ริฟิเคชัน (transesterification reaction) และที่ปริมาณ PBAT น้อยไม่เกิดปฏิกิริยาที่สำคัญ เนื่องจากเกิดการกลับเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง สำหรับสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่มี PBAT 70 wt% พบว่า PBAT-g-MTPS มีความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่า PBAT-g-TPS ที่เติม MA ในการเตรียม MTPS พบว่า ปริมาณ MA ที่เพิ่มขึ้น ไม่มี

อิทธิพลต่อความต้านทานต่อแรงดึง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การพัวพันของสายโซ่ PBAT และ MTPS ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากการผสม

Mohanty และคณะ (2009) ศึกษาอิทธิพลของแป้งต่อสมบัติเชิงกล, สมบัติทางความร้อน, ลักษณะสัญญาณวิทยาและพฤติกรรมการย่อยสลาย โดยทำการผสม PBAT กับ TPS ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และเติมดินเหนียวนาโน (nanoclay) 1-5% เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน ดินเหนียวนาโน ที่ใช้ในการศึกษาคือ Cloisite C20A และ Cloisite C30B พอลิเมอร์ผสมขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเทคนิคการลาดฟิล์ม (film casting) จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่มี TPS 30 wt% และเติม C30B มีค่ามอดูลัสและระยะยืด ณ จุดขาดมากที่สุด จากการศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยาพบว่า การกระจายของ TPS ใน PBAT ได้รับการปรับปรุงเมื่อเติม C30B จากการทดสอบ DSC ยืนยันการเพิ่มขึ้นของ Tg, Tm และ Tc ของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสม จากการทดสอบ DMA พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีมอดูลัสสะสม และ Tg เพิ่มขึ้นเมื่อเติมดินเหนียวนาโน สำหรับการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพพบว่า ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น

Brandelero และคณะ (2010) ทำการศึกษาอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิว (Tween 80) ต่อฟิล์มผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลัง (TPS) กับ PBAT ฟิล์มของ TPS ผสม PBAT ผสมด้วยเครื่องอัดรีดและเป่าขึ้นรูป พบว่าฟิล์มมีความชอบน้ำเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้น การเติม Tween 80 เพิ่มสัมประสิทธิ์การแพร่และการซึมผ่านของไอน้ำ แสดงว่าสารลดแรงตึงผิวเพิ่มช่องว่าง (free volume) ระหว่างสายโซ่ของแป้ง สำหรับความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมากกว่าของฟิล์มแป้ง และความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น

2.8.1.6 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่น ๆ

Kanzawa และ Tokumitsu (2011) ศึกษาสมบัติเชิงกลและลักษณะสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA, PC และ PBAT ทำการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยเติมไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) เป็นตัวริเริ่ม จากการทดสอบ DMA พบว่า PC กับ PBAT เข้ากันได้ดี จาก SEM แสดงให้เห็นความเข้ากันได้ของ PLA กับ PBAT ที่อัตราส่วน 70:30 ถูกปรับปรุงโดยการเติม DCP และจากการศึกษาด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (nuclear magnetic resonance, NMR) พบว่าปริมาณมากที่สุดของ DCP ที่เติมในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBAT สำหรับการผสม PLA/PBAT/PC คือ 0.5 phr

Shi และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงโครงสร้างและสมบัติของเส้นใยพอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเรต (poly(butylene terephthalate), PBT) ผสมกับ PBAT ปั่นหลอมด้วย

ความเร็วสูง โดยมี PBT เป็นส่วนของเปลือกด้านนอกและ PBAT เป็นส่วนของแกนในเส้นใย ด้วยความเร็วสูง 10 km/min สมบัติของเส้นใย PBT/PBAT มีการปรับปรุงเมื่อเปรียบเทียบกับ การปั่น PBT และ PBAT เพียงอย่างเดียว จากการศึกษากการปรับปรุงโครงสร้างของเส้นใย พบว่าการจัดเรียงตัวของโมเลกุลและการปรับปรุงโครงสร้างผลึกของส่วน PBT เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของ PBAT ไม่มีการปรับปรุง โครงสร้างที่เพิ่มขึ้นของ PBT ปรับปรุงทั้งสมบัติทางความร้อนและความต้านทานต่อแรงดึง ในทางกลับกันส่วนของ PBAT พบว่าโครงสร้างโมเลกุลไม่มีการจัดเรียงทั้งในส่วนผลึกและอสัณฐาน ซึ่งเป็นลักษณะที่ต้องการ สำหรับการนำเส้นใยไปใช้งาน

Javadi และคณะ (2010) ศึกษาการขึ้นรูปและลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ผสม ระหว่าง PHBV และ PBAT โดยศึกษาการเตรียม 2 วิธีคือ วิธีฉีดแบบดั้งเดิม (conventional injection molding) และวิธีฉีดแบบ microcellular (microcellular injection molding) จาก การศึกษาพบว่าขึ้นตัวอย่างที่เตรียมด้วยการฉีดแบบ microcellular เข้ากันได้ดีกว่าขึ้นตัวอย่าง ที่เตรียมด้วยการฉีดแบบดั้งเดิม ปริมาณ PBAT ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเหนียว (toughness) และ ระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดูลัสและความแข็งแรงลดลง ขึ้นตัวอย่างที่เตรียมด้วยการ ฉีดแบบ microcellular พบว่าการเพิ่มปริมาณของ PBAT เพิ่มขนาดของเซลล์แต่ลดความหนาแน่นของเซลล์ สำหรับความสามารถในการเกิดผลึกของ PHBV ใน PHBV/PBAT ลดลง เมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้นทั้งการเตรียมด้วยการฉีดแบบดั้งเดิมและการฉีดแบบ microcellular

Andricic และคณะ (2006) ศึกษาความเข้ากันได้และย่อยสลายผ่านปฏิกิริยา ออกซิเดชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC กับ PBAT พอลิเมอร์ผสมเตรียมด้วยการผสม แบบสารละลาย โดยละลายใน 1,2-ไดคลอโรอีเทน (1,2-dichloroethane) และตกตะกอนในเมทานอล (methanol) จากการทดสอบ DSC พบว่าพอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้อย่าง สมบูรณ์ จาก FTIR แสดงให้เห็นว่ามีพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นระหว่าง C=O ของ PBAT กับ α -ไฮโดรเจนของ PVC นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการสลายตัวของไฮโดรเจนและคลอรีนใน PVC ลดลงเมื่อเติม PBAT

Ibrahim และคณะ (2011) ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVC กับ PBAT เตรียมโดย การผสมแบบหลอม จากการทดสอบ FTIR พบว่าพีด C=O เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 1,714 เป็น 1,718 cm^{-1} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาระหว่าง C=O ของ PBAT กับ α -ไฮโดรเจนของ PVC จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน 50/50 มีความต้านทานสูง ที่สุด จากการทดสอบ DMA พบว่า PVC และ PBAT สามารถเข้ากันได้ เนื่องจากมี Tg เพียง ค่าเดียวในพอลิเมอร์ผสม การเติม PBAT ทำให้ความเหนียวลดลงและเพิ่มความยืดหยุ่น (elasticity) จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า อุณหภูมิการสลายตัวของ PVC ใน

พอลิเมอร์ผสมลดลง จากการศึกษาด้วย SEM พบว่ามีการยึดติดระหว่างผิวที่ดี ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

Srithep และคณะ (2011) ศึกษาอิทธิพลของการเติมสารตัดสายโซ่โมเลกุล (chain extender, CE) เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์และ PBAT เป็นสารเพิ่มความเหนียวให้กับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตนำกลับมาใช้ใหม่ (recycled poly(ethylene terephthalate, RPET) เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล ทำการผสมด้วยการผสมแบบหลอม จากการศึกษาพบว่า สมบัติเชิงกลของ RPET สามารถปรับปรุงได้โดยการเติม CE และ PBAT หรือ TPE โดยการเติม CE ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของ RPET เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดและสมบัติเชิงกลของ RPET เพิ่มขึ้น ขณะที่ TPE ปรับปรุงสมบัติเชิงกลเล็กน้อย เนื่องจากเข้ากันได้ไม่ดีกับ RPET

Shi และคณะ (2011) ศึกษาอิทธิพลของส่วนประกอบและโครงสร้างของฟิล์มแป้ง (starch) ผสม PBAT และ PE โดยผสมแป้ง PBAT และ PE ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเทคนิคการเป่าฟิล์ม พบว่าพอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ดีและสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้โดยไม่ต้องเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ สมบัติเชิงกลของฟิล์มได้รับการปรับปรุงตามปริมาณ PE ที่เพิ่มขึ้น การย่อยสลายทางชีวภาพไม่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นตามปริมาณวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สำหรับฟิล์มที่ไม่มี PE พบว่าย่อยสลายได้ประมาณ 50% ของค่าในทางทฤษฎี แต่สำหรับฟิล์มที่มี PE พบว่าการย่อยสลายทางชีวภาพลดลงตามสัดส่วนของ PE ที่เพิ่มขึ้น จากการศึกษาโครงสร้างพบว่า มีการแยกเฟสและโครงสร้างของ gelose 80 แทรกอยู่ระหว่างเฟส

2.8.1.7 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และสารเสริมแรง

Ludvik และคณะ (2007) ได้ทำการเตรียมเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber) และศึกษาสมบัติเชิงกลและการทนน้ำของคอมโพสิตที่ประกอบด้วย PLA, PBAT, เส้นใยเซลลูโลสและดินเหนียว เตรียมคอมโพสิตโดยการกระจายเส้นใยในเจลเหลว (aqueous gel) ของโซเดียมเบนโทไนต์เคลย์ (sodium bentonite clay) ได้เป็นเจลของดินเหนียว-เส้นใย (clay-fiber gel) จากนั้นนำมาผสมกับ PLA และ PBAT ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่โดยอัตราส่วนของ PLA/PBAT ที่ใช้ในการศึกษาคือ 70/30 จากการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงของคอมโพสิต PBAT ลดลงจาก 19 MPa เป็น 13 MPa เมื่อเทียบกับ PBAT บริสุทธิ์และความแข็งแรงของคอมโพสิต PLA/PBAT ลดลงจาก 38 MPa เป็น 27 MPa เมื่อเทียบกับ PLA/PBAT ระบุยึด ณ จุดขาดของคอมโพสิต PBAT ลดลงเช่นเดียวกันจาก 831% เป็น 170% และระบุยึด ณ จุดขาดของคอมโพสิต PLA/PBAT ก็ลดลงจาก 8.7% เป็น 4.9% แต่ค่ามอดูลัสของคอมโพสิต PBAT เพิ่มขึ้นจาก 61 MPa เป็น 149 MPa และมอดูลัสของคอมโพสิต PLA/PBAT เพิ่มขึ้นจาก 965 MPa เป็น 1,328 MPa จากการศึกษาการทนน้ำพบว่า คอมโพสิตสามารถทนน้ำได้ดี

Jiang และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วย PLA, PBAT และอนุภาคนาโน เช่น มอนต์โมริลโลไนต์ เคลย์ (montmorillonite clay, MMT) หรือนาโนไฮดรอกซีฟิเทตแคลเซียมคาร์บอเนต (nanosized precipitated calcium carbonate, NPCC) โดยผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูแบบคู่ จากการทดสอบพบว่า การเติม PBAT 10 wt% ช่วยปรับปรุงระยะยืดของ PLA แต่ลดความแข็งแรงและมอดูลัส การเติม MMT ในปริมาณเล็กน้อยช่วยเพิ่มความแข็งแรงและมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม และการเติม NPCC ทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมลดลงเล็กน้อยและมอดูลัสไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทั้ง MMT และ NPCC ทำให้ระยะยืดลดลงมาก โดย MMT ลดลงมากกว่า NPCC การเพิ่มระยะยืดของพอลิเมอร์ผสมทำได้โดยการเติมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิแลกติกแอซิด (maleic anhydride grafted polylactic acid, MA-g-PLA) และสูตรที่ให้สมบัติที่ดีที่สุดคือ PLA 10 wt% PBAT 25 wt% MMT และเติม MA-g-PLA โดยมีความแข็งแรง 87% ของ PLA บริสุทธิ์ มอดูลัสสูงขึ้นเล็กน้อยและสามารถปรับปรุงระยะยืดได้มากกว่า PLA บริสุทธิ์ 16.5 เท่า

Ko และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างท่อคาร์บอนแบบหลายชั้น (multi-walled carbon nanotube, MWNT), PLA และ PBAT ทำการเตรียมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยแปรปริมาณของ PLA และ PBAT ส่วนปริมาณของ MWNT คงที่ จากผลการทดลองพบว่า PLA กับ PBAT ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและ MWNT อยู่ใกล้กับส่วนของ PBAT เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างผิวของพอลิเมอร์กับ MWNT นอกจากนี้ยังมีอีกหลายปัจจัย เช่น ความหนืดของพอลิเมอร์ผสม ความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์และโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ พบว่ามีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของ MWNT ในเฟสของ PBAT และการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมมี 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกเป็นการสลายตัวของ PLA ส่วนในขั้นตอนที่ 2 เป็นการสลายตัวของ PBAT และสมบัติทางความร้อนเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PBAT ที่เพิ่มขึ้น และสมบัติการไหลพบว่าทั้งแรงเฉือนและความหนืดมีลักษณะเฉพาะเป็น shear thinning เนื่องจากการกระจายตัวของ MWNT

Raquez และคณะ (2011) ทำการเตรียม MTPS-g-PBAT กราฟต์โคพอลิเมอร์ และเสริมแรงด้วยดินเหนียว ซึ่งดินเหนียวที่ใช้ในการศึกษาคือ hydrophilic Cloisite Na และ organophilic Cloisite 30B จากการศึกษาพบว่าสูตรที่ดีที่สุดคือสูตรที่เติม Cloisite 30B โดยพบว่ามีความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่า 35 MPa เปรียบเทียบกับ PBAT-g-MTPS ซึ่งมีความต้านทานต่อแรงดึง 16 MPa และมีระยะยืด ณ จุดขาดมากกว่า 800% สำหรับสมบัติการป้องกันน้ำซึมผ่านไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของ MTPS-g-PBAT ที่เติมดินเหนียวดีกว่า MTPS-g-PBAT ที่ไม่เติมดินเหนียว และจากการศึกษา MTPS-g-PBAT ที่เติม Cloisite 30B ด้วย WAXD และ TEM พบว่าชั้นของ Cloisite 30B บางส่วนแยกออกจากกันและกระจายตัวแทรกใน MTPS-g-PBAT

Correlo และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของไคโตซานที่ผสมกับ อะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ โดยนำไคโตซานผสมกับ PBAT ด้วยการผสมแบบการหลอม พบว่า เมื่อผสมไคโตซานกับ PBAT ทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเพียงเล็กน้อย ระยะเวลายืด ณฑ จุดขาดลดลงมาก แต่ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น

Someya และคณะ (2005) เตรียมนาโนคอมโพสิต PBAT ผสม montmorillonite (MMT) โดยวิธีผสมแบบแทรกสอดโดยการหลอม MMT ที่ใช้ในงายวิจัยประกอบด้วย MMT ที่ไม่มีการดัดแปร และดัดแปรด้วยโดเดซิลามีน (dodecylamine) ออกตะติซิลามีน (octadecylamine) และ *N*-ลอริลไดเอทานอลามีน (*N*-lauryldiethanolamine) เป็น DA-M ODA-M และ LEA-M ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า PBAT คอมโพสิตของ PBAT/ดินเหนียวปรับสภาพ (organoclay) ที่ปริมาณ 3 wt% เกิดการผสมกันแบบแทรกสอดในกรณีของ DA-M และ LEA-M และเกิดการผสมแบบแยกชั้นในกรณีของ ODA-M จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ด้วย TEM พบว่า ODA-M กระจายใน PBAT เมทริกซ์ดีกว่า DA-M และ LEA-M จากการศึกษาความต้านทานต่อแรงดึงพบว่า PBAT คอมโพสิตที่เติม ODA-M 3 wt% มีค่ามอดุลัส น้อยกว่า DA-M และ LEA-M เนื่องจาก ODA-M ชะลอการเกิดผลึกของ PBAT และที่ปริมาณ MMT 5 wt% พบว่า PBAT คอมโพสิตที่เติม ODA-M มีค่ามอดุลัส ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะเวลายืด ณฑ จุดขาดมากกว่า DA-M และ LEA-M

Averous และ Digabel (2006) ศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของไบโอ-คอมโพสิต PBAT กับลิกโนเซลลูโลสฟิลเลอร์ (lignocellulosic fillers) จากการศึกษาพบว่า การเติมฟิลเลอร์ช่วยเพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวของ PBAT จาก DSC พบว่าฟิลเลอร์ไม่เปลี่ยนแปลงความสามารถในการเกิดผลึกของ PBAT และพบว่า Tg เพิ่มขึ้น จากการศึกษา สมบัติเชิงกลพบว่า ไบโอคอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น เนื่องจากฟิลเลอร์และ PBAT เข้ากันได้ดี

Chivrac และคณะ (2006) ศึกษาวิธีการผสมนาโนคอมโพสิตและสมบัติเชิงกลของ PBAT ผสมกับดินเหนียวนาโน โดยศึกษาวิธีการเตรียม 2 วิธี คือ การผสมแบบสารละลายและการผสมแบบหลอม พบว่าการผสมแบบสารละลายเกิดการผสมแบบแทรกสอดมากกว่าการผสมแบบหลอม จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) และ DSC พบว่าปริมาณผลึกของ PBAT ลดลงเมื่อมีการเติมดินเหนียว ซึ่งอาจเกิดจากดินเหนียวไปขัดขวางการโตของผลึก PBAT และดินเหนียวไม่มีอิทธิพลกับ Tg และ Tm ของนาโน-คอมโพสิต จากการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (thermogravimetric analysis, TGA) พบว่า นาโนคอมโพสิตที่มีปริมาณดินเหนียว 3 wt% มีการปรับปรุงความเสถียรทางความร้อน สำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงพบว่า นาโนคอมโพสิตมี

ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณดินเหนียว แต่ระยะยืด ณ จุดคราก และระยะยืด ณ จุดขาดลดลง

Shahlari และ Lee (2008) ได้ทำการศึกษา PBAT ผสมกับดินเหนียว พบว่าการเติมดินเหนียวช่วยเพิ่มยังมอดุลัสและมอดุลัสแรงโค้งงอของ PBAT และจากการทดสอบ DSC พบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวของ PBAT นาโนคอมโพสิตมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่ PLA เกิดการเปลี่ยนแปลงมาก จากการทดสอบ XRD พบว่า ชั้นดินเหนียวแทรกอยู่ทั้งใน PBAT และ PBAT ผสมกับ PLA และพบว่าการเติมดินเหนียวลงในพอลิเมอร์ผสมลดขนาดของเฟส PLA ดังนั้นจึงเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้

Iwakura และคณะ (2008) ศึกษาความแข็งแรงของ PBAT ผสมกับพอลิเมอร์ผลึกเหลว (liquid crystalline polymer, LCP) โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จากการทดสอบ DSC พบว่าอัตราการเกิดผลึกของ PBAT เพิ่มขึ้นเมื่อเติม LCP และ LCP ที่กระจายอยู่ใน PBAT เป็นนิวเคลียส (nuclei) ให้เกิดผลึก PBAT อิทธิพลของการเกิดนิวเคลียส (nucleation) ของ LCP ใน PBAT ทำให้ PBAT และ LCP เข้ากันได้ดีและเมื่อเติม LCP 20% พบว่า Tc เปลี่ยนจาก 50°C เป็นมากกว่า 95°C จากการทดสอบความทนต่อแรงดึงพบว่า ค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมมากขึ้นตามปริมาณ LCP ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าเป็นผลมาจากความแข็งแรงของ LCP ใน PBAT

Sykacek และคณะ (2009) ทำการผสมพอลิเมอร์กับผงไม้ด้วยการอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยพอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ PBAT PLA PBAT/PLA (Ecovio[®]) PLA/CP (Bioflex[®]) และ Tenite[®] propionate 371A 4000012 และสามารถเติมผงไม้ได้ถึง 70% จากการทดสอบสมบัติแรงดึงพบว่า ไบโอบอลิเมอร์ได้รับการปรับปรุง ยกเว้น PLA ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่การทนต่อแรงกระแทกและการทนน้ำลดลงตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้น ในระหว่างการผสมและการขึ้นรูปพบว่า เมื่อเปลี่ยนชนิดของไบโอบอลิเมอร์หรือการเติมเส้นใยไม้จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ ทำให้ง่ายต่อการผลิต ประหยัดเวลาและพลังงาน ไบโอบอลิเมอร์ที่ผสมผง-ไม้ลดการเกิดรอยจากการหดตัว (shrinkmarks) และการบิดตัว (warpages) แต่ความสามารถในการไหลของไบโอบอลิเมอร์ลดลงและความเปราะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยมากกว่า 50% และจากการศึกษาพบว่า ไบโอบอลิเมอร์ที่ได้รับการปรับปรุงทางด้านความแข็งแรงและค่า มอดุลัสมากที่สุดเมื่อเติมผงไม้คือ PBAT เนื่องจาก PBAT สามารถยึดติดกับผงไม้ได้ดี

Madera-Santana และคณะ (2009) ศึกษาการเตรียมและลักษณะของคอมโพสิตระหว่างวุ้น (agar) กับ PBAT เตรียมด้วยการอัดรีด จากการศึกษสมบัติเชิงกลพบว่า วุ้นเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึงและมอดุลัส และลดระยะยืด ณ จุดขาด จาก DMA พบว่าการเติมวุ้นช่วยเพิ่มมอดุลัสสะสม แต่การวัดค่า Tg ด้วย DMA พบการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อาจเกิด

จากการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างผิว จาก TGA พบว่าความเสถียรทางความร้อนของคอมโพสิตมีค่าอยู่ระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง จาก DSC พบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกและเพิ่ม T_m และ T_c และจากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่ากระจายอยู่ใน PBAT

Yang และ Qiu (2011) ศึกษาอิทธิพลของดินเหนียวต่อพฤติกรรมการเกิดผลึก ความเสถียรทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับดินเหนียว (Cloisite 30B, C30B) จากการทดสอบ WAXD พบว่าที่ปริมาณ C30B น้อยกว่า 5 wt% ชั้นของดินเหนียวแยกออกจากกันและกระจายตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ (exfoliated) และที่ปริมาณ C30B 8 wt% มีการกระจายของดินเหนียวทั้งแบบแยกออกจากกันและแบบแทรกสอด (intercalated) จากการศึกษาศักยภาพในการเกิดผลึกพบว่า C30B ช่วยเพิ่มการเกิดผลึกของ PBAT นอกจากนี้ยังพบว่า ความเสถียรทางความร้อนของ PBAT ลดลง แต่โมดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณ C30B ที่เพิ่มขึ้น

Chen และคณะ (2011) ศึกษาลักษณะเฉพาะของนาโนคอมโพสิต PBAT ผสมกับ MMT เตรียมโดยการผสมแบบสารละลาย สำหรับ MMT มีการดัดแปลงด้วย ODA จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่า ลักษณะพื้นผิวของนาโนคอมโพสิต PBAT/ODA-M เรียบกว่าคอมโพสิต PBAT/MMT จากการศึกษาด้วย TEM พบว่า ODA-M สามารถกระจายบน PBAT เมทริกซ์ได้ดีกว่า MMT จากการศึกษาด้วย DSC พบว่าการเติมดินเหนียวสามารถเพิ่มอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) และอัตราการเกิดผลึกของ PBAT นอกจากนี้จากการศึกษา TGA พบว่า ODA-M สามารถปรับปรุงความเสถียรทางความร้อนของนาโนคอมโพสิต แต่ความเสถียรทางความร้อนของนาโนคอมโพสิตเริ่มลดลงเมื่อมีปริมาณดินเหนียวมากกว่า 5 wt% จากการศึกษาค่าความต้านทานต่อแรงดึงพบว่าความต้านทานต่อแรงดึงมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ โมดูลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณของดินเหนียว สำหรับการย่อยสลายทางชีวภาพพบว่า การย่อยสลายทางชีวภาพโดยแสงและการย่อยสลายทางชีวภาพผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ PBAT ลดลงเมื่อเติมดินเหนียว จากการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำพบว่า เมื่อเติม ODA-M ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำลดลง แม้ว่าคอมโพสิตจะมีความชอบน้ำมากขึ้นก็ตาม

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการย่อยสลายทางชีวภาพของ PBAT

Witt และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษการย่อยสลายทางชีวภาพของอะลิฟาติกอะโรมาติกโคพอลิเอสเตอร์ ทำการทดสอบโดยแช่ในตุ่มกลางที่มี *thermomonospora fusca* เป็นเวลา 22 วัน พบว่าเกิดการย่อยสลาย 99.9% โดยพบเพียงไดแอซิด และไดเออลของ PBAT

และมอนอเมอร์ของโคพอลิเอสเทอร์ (1,4-บิวตะไดอินเทรฟเทอเรตและอะดิเพต) ซึ่งตรวจพบด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี/แมสสเปกโตรสโกปี (gas chromatography/mass spectroscopy, GC-MS) และเมื่อนำสารละลายมาทดสอบความเป็นพิษด้วยไรน้ำ (*daphnia magna*) และโฟโต-แบคทีเรียฟอสฟอเรียม (*photobacterium phosphoreum*) พบว่าไม่มีความเป็นพิษ ทั้งมอนอ-เมอร์และโอลิโกเมอร์ สามารถสรุปได้ว่าอะลิฟาติกอะโรมาติกโคพอลิเอสเทอร์ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการย่อยสลาย

Kijchavengkul และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการสลายตัวของฟิล์มอะลิฟาติกอะโรมาติกพอลิเอสเทอร์ย่อยสลายทางชีวภาพ ภายใต้สภาวะที่มีแสงและการฝังดินในบริเวณร้อนชื้น พบว่าการย่อยสลายด้วยแสงเป็นบทบาทหลักของการย่อยสลายฟิล์ม เพราะความสมบูรณ์ของฟิล์มและสมบัติเชิงกลลดลงหลังจาก 8 สัปดาห์ เนื่องจากการตัดสายโซ่หลัก และจากรูป SEM และสเปกตรัมของฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายด้วยแสงเริ่มต้นจากด้านที่เป็ดรับแสง และแพร่กระจายไปยังพอลิเมอร์เมทริกซ์หลังจากสัปดาห์ที่ 8 และ FTIR ยังแสดงให้เห็นว่าเกิดการบวนการออกซิเดชันด้วยแสง การลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของชิ้นตัวอย่างที่นำไปฝังดินลดลงช้ากว่าชิ้นตัวอย่างที่ย่อยสลายด้วยแสง

Kijchavengkul และคณะ (2010) ศึกษาอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพและอัตราการไฮโดรไลซิสของ PBAT โดยทดสอบในปุ๋ยคอก อาหาร ลานหมักปุ๋ย สารละลายบัฟเฟอร์-ฟอสเฟส (pH = 8.0) และเวอร์มิคูไลท์ (vermiculite) ที่อุณหภูมิ 58°C พบว่าการทดสอบในปุ๋ยคอกมีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสูงที่สุด เนื่องจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดและมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) น้อยที่สุด จากการศึกษาด้วย $^1\text{H-NMR}$ และการวิเคราะห์ทางความร้อนพบว่า PBAT เป็นโคพอลิเอสเทอร์กิ่งผลึก ซึ่งเป็นผลึกร่วมของ BT และ BA ในระหว่างการย่อยสลายทางชีวภาพพบว่าผลึก PBAT เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าส่วนอสัญฐานของ PBAT เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพเร็วกว่าส่วนที่เป็นผลึก

Oyama และคณะ (2011) ทำการผสมพอลิแลคติก แอซิดโคแลกไทด์ (poly(aspartic acid-co-lactide), PAL) และ PBAT กับ PLA เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ PLA ที่เปราะและมีความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำ และศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ จากการศึกษาพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีในระหว่างการใช้งานและการเก็บรักษา แต่มีโครงสร้างที่ย่อยสลายง่ายเมื่อแช่น้ำ พอลิเมอร์ผสมเตรียมด้วยเทคนิคการผสมแบบหลอม โดยในระหว่างการผสม PLA กับ PBAT ทำการเติม PAL ในปริมาณเล็กน้อย เป็นตัวเร่งการย่อยสลายทางชีวภาพ ทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการแช่ฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมใน phosphate-buffered saline (pH 7.3) ที่อุณหภูมิ 40°C แสดงให้เห็นว่าปริมาณ PAL และอัตราส่วนมีอิทธิพลต่อลักษณะสัญญาณวิทยา สมบัติเชิงกลและอัตราการ

ไฮโดรไลซิสของพอลิเมอร์ผสม พบว่าการเติม PAL ไม่ช่วยเร่งการย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA และ PBAT ที่อุณหภูมิ 25°C ความชื้นสัมพัทธ์ 60% สำหรับอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของทั้ง PLA และ PBAT เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PAL เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PAL มากจะมีขนาดของ PBAT เล็กกว่า ดังนั้นจึงมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PAL น้อย PLA และ PAL ช่วยเร่งอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของ PBAT แต่ PBAT ไม่ช่วยเร่งอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA ในพอลิเมอร์ผสม

Wu (2011) ศึกษาความสามารถในการย่อยสลาย ลักษณะสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่เตรียมจาก PBAT และเส้นใยป่านศรนารายณ์ (sisal fiber, SF) จากการศึกษาพบว่า คอมโพสิตที่ประกอบด้วย PBAT-g-AA/SF มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากความสามารถในการเข้ากันได้ของส่วนประกอบทั้งสอง SF กระจายใน PBAT-g-AA ได้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นผลมาจากกลุ่มเอสเทอร์จากหมู่คาร์บอกซิลิกของ PBAT-g-AA และหมู่ไฮดรอกซิลของ SF เมื่อศึกษา SEM ของชิ้นตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพพบว่า โครงสร้างฟิล์มถูกทำลายอย่างรุนแรงหลังจากการบ่ม 60 วัน และทั้งฟิล์ม PBAT และ PBAT-g-AA ก็ถูกย่อยสลายทางชีวภาพอย่างสมบูรณ์ แต่ฟิล์ม PBAT-g-AA เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้มากกว่า PBAT สำหรับการทนน้ำพบว่า PBAT-g-AA/SF สามารถทนน้ำได้มากกว่า PBAT/SF

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 สารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. พอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรพทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) ชนิด Ecoflex™ F BX 7011 ผลิตโดย BASF มีจุดหลอมเหลว เท่ากับ 110 – 120 °C ดัชนีการไหลเท่ากับ 2.7 – 4.9 g/10 min เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 190 °C ด้วยตุ้มน้ำหนัก 2,160 g และมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.25 – 1.27 g/cm³
2. ยางธรรมชาติชนิดความหนืดคงที่ (STR 5L CV60) ผลิตโดย บริษัท จะนะน้ำยาง จำกัด มีความหนืดมูนี้เท่ากับ 54.03 ML 1+4 (100°C)
3. ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (epoxidized natural rubber, ENR) ชนิด Epoxyrene™ 25 (ENR25) ผลิตโดย บริษัท เมืองใหม่กัตตรี จำกัด มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ (epoxide content) เท่ากับ 25 mol% มีความหนืดมูนี้เท่ากับ 81.60 ML 1+4 (100°C)
4. ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (epoxidized natural rubber, ENR) ชนิด Epoxyrene™ 50 (ENR50) ผลิตโดย บริษัท เมืองใหม่กัตตรี จำกัด มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ (epoxide content) เท่ากับ 50 mol% มีความหนืดมูนี้เท่ากับ 71.76 ML 1+4 (100°C)
5. สารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) สำหรับยางชนิด Wingstay™ L จำหน่ายโดย ห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด
6. กรดสเตียริก (stearic acid) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (activator) และเป็นสารช่วยบดย่อยยาง เพื่อให้ยางนิ่ม จัดจำหน่ายโดย ห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด
7. ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) ชนิด White seal ทำหน้าที่เป็นสารตัวกระตุ้น (activators) จากบริษัท Univenture Public Co., Ltd.
8. N-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamide (CBS) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง (accelerator) จากบริษัทเคมีอินโนเวชั่น จำกัด
9. ซัลเฟอร์ (sulphur) ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent หรือ curing agent) จากบริษัทสยามเคมี จำกัด

3.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. เบ้าพิมพ์สำหรับอัดทำด้วยสแตนเลสรูปทรงสี่เหลี่ยมมีความกว้าง 12 cm ความยาว 12 cm ความหนา 2 mm
2. เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง ผลิตโดย บริษัท Mettler Co., Ltd.
3. ตู้อบบ่มแรงชนิด gear aging ผลิตโดย บริษัท Tabai Espec Corp รุ่น GPHH-100
4. ตู้อบความร้อน ผลิตโดย บริษัท MEMMERT จัดจำหน่ายโดย บริษัท เค เอส พี อินเตอร์คอม จำกัด
5. เครื่องวัดความหนา ความละเอียด 0.01 mm ผลิตโดย บริษัท TeclockTM รุ่น SM-112
6. เครื่องวัดความหนา ความละเอียด 0.001 mm ผลิตโดย Central Tools รุ่น 6144
7. โถดูดความชื้น

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 inch ยาว 23 inch ผลิตโดยโรงงานชัยเจริญการช่าง
2. เครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ผลิตโดยบริษัท BrabenderTM GmbH & Co. KG รุ่น 350E
3. ชุดเป่าฟิล์มประกอบด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) BrabenderTM GmbH & Co. KG รุ่น Extruder 19/25D ดายสำหรับเป่าและอุปกรณ์ดึงฟิล์ม
4. เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) ผลิตโดยบริษัท PrismTM รุ่น TSE 16TC
5. เครื่องอัดความดัน (compression molding) ผลิตโดยบริษัท Kao Tieh รุ่น KT-7014
6. เครื่องตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D412 แบบ Die C และตัดชิ้นทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D624 แบบ Die C
7. เครื่องทดสอบสมบัติการดึงยืด ผลิตโดยบริษัท LLOYD instrument รุ่น LR10K
8. เครื่องวัดความแข็งแบบชอเอ (Hardness Shore A) รุ่น Shore DurometerTM PTC 408

9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ผลิตโดย บริษัท JEOL รุ่น JSM-5800LV

10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ผลิตโดย บริษัท Quanta รุ่น 400 FEI

11. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) ผลิตโดยบริษัท Perkin Elmer รุ่น DSC7

3.4 วิธีการดำเนินการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมและสมบัติต่างๆ ของ PBAT ผสมกับยางธรรมชาติ และทำการเป่าขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูป

3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT ผสมกับยางธรรมชาติ

3.4.1.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว

มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ผสมยางธรรมชาติกับ WingstayTM L ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) โดยใน 3 นาที โดยเริ่มแรกบดยางให้ نرم เติม WingstayTM L 1 phr บดอย่างต่อเนื่องประมาณ 3 นาทีเพื่อให้ WingstayTM L กระจายในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น จากนั้นรีดยางธรรมชาติเป็นแผ่น

2. นำยางธรรมชาติที่เตรียมได้จากข้อ 1 ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อความสะดวกในการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว

3. ผสม PBAT และยางธรรมชาติพร้อมกันในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว สภาวะการผสมมีดังนี้ อุณหภูมิโซน 1, 2, 3 และ 4 (Die) เท่ากับ 100°C, 110°C, 120°C และ 120°C ตามลำดับ ความเร็วรอบของสกรูรอบที่ 1 เท่ากับ 100 rpm และความเร็วรอบของสกรูรอบที่ 2 และ 3 เท่ากับ 120 rpm

3.4.1.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ผสมยางธรรมชาติกับ WingstayTM L ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) โดยใน 3 นาที โดยเริ่มแรกบดยางให้ نرم เติม WingstayTM L 1 phr บดอย่างต่อเนื่อง

อีกประมาณ 3 นาทีเพื่อให้ Wingstay™ L กระจายในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น จากนั้นรีดยางธรรมชาติเป็นแผ่น

2. นำยางธรรมชาติที่เตรียมได้จากข้อ 1 ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อความสะดวกในการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

3. ผสม PBAT และยางธรรมชาติพร้อมกันในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ สภาวะการผสมมีดังนี้ อุณหภูมิโซน 1, 2 และ 3 (die) เท่ากับ 100°C, 110°C และ 120°C ตามลำดับ ความเร็วรอบของสกรูรอบที่ 1 เท่ากับ 100 rpm และความเร็วรอบของสกรูรอบที่ 2 และ 3 เท่ากับ 120 rpm

3.4.1.3 การเตรียม PBAT ผสมยางด้วยเครื่องผสมแบบปิด

ทำการผสม PBAT กับยาง โดยเติม PBAT ลงในเครื่องผสมแบบปิดที่มีปริมาตรห้องผสม 370 cm³ โดยใช้ fill factor 0.65 เป็นเวลาประมาณ 3 min ที่อุณหภูมิ 120 °C ความเร็วรอบ 100 rpm เติมยางลงไปและใช้เวลาบดผสมประมาณ 2 min จากนั้นเติม Wingstay™ L บดต่ออีกเป็นเวลา 2 min นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ออกจากเครื่องผสม และตัดเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อความสะดวกในการอัดขึ้นรูป

3.4.1.4 การเตรียม PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด

ทำการผสม PBAT กับยางธรรมชาติ สูตรคอมพาวด์ของยางธรรมชาติที่ใช้ในการเตรียมแสดงในตารางที่ 3.1

ลำดับขั้นตอนการผสม

1. เติม PBAT ลงในเครื่องผสมแบบปิดที่มีปริมาตรห้องผสม 370 cm³ โดยใช้ fill factor 0.65 เป็นเวลาประมาณ 3 min ที่อุณหภูมิ 110 °C ความเร็วรอบ 100 rpm

2. เติมยางธรรมชาติลงไปและใช้เวลาบดผสมประมาณ 2 min จากนั้นเติมสารเคมี บดต่ออีกเป็นเวลา 2 min

3. นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ออกจากเครื่องผสม และตัดเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อความสะดวกในการอัดขึ้นรูป

3.4.2 การเตรียมชิ้นทดสอบโดยใช้กระบวนการอัด (compression molding)

นำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มาขึ้นรูปเป็นแผ่น ความหนา 2 mm ด้วยเครื่องอัดความดันที่อุณหภูมิ 120°C ความดัน 300 kg/cm² เป็นเวลา 10 min ทำการหล่อเย็น เป็นเวลา 10 min สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่ผสมกับยางวัลคาไนซ์ใช้เวลาและอุณหภูมิ แสดงดัง

ตารางที่ 3.2 ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการคงรูป (cure time) ของยางวัลคาไนซ์ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการวัลคาไนซ์ของยาง (rherometer, MDR)

ตารางที่ 3.1 สูตรยางคอมปาวด์

Chemicals	phr
rubber	100
stearic acid	2.0
ZnO	5.0
Wingstay™ L	1.0
CBS	1.5
sulfur	2.0

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยยางคอมปาวด์

Rubber type	Temperature (°C)	Time (min)
NR	140	15
ENR25	130	8
ENR50	120	16

3.4.3 การขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูป (blown film extrusion)

มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- นำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จากเครื่องผสมแบบปิดมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อความสะดวกในการป้อนเข้าเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวสำหรับการเป่าฟิล์ม
- นำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมไว้แล้วมาใส่ในช่องใส่สาร (hopper) ของเครื่องเป่าฟิล์มแล้วทำการขึ้นรูปฟิล์มบางด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป (blown-film extrusion) สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปดังนี้ อุณหภูมิสกรูโซนที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 120°C, 135°C และ 145°C ตามลำดับ อุณหภูมิที่ตายเท่ากับ 140°C ความเร็วรอบของสกรู 10 rpm ความดันลม 5 psi และความเร็วในการม้วนเก็บ 1 m/min

3.4.4 การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง (tensile properties testing)

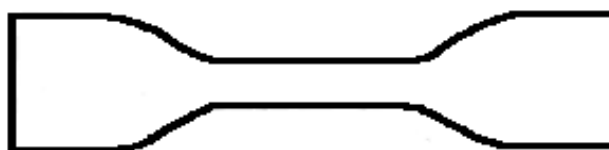
ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412C โดยนำพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปแล้วตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้เครื่องตัดชิ้นทดสอบแบบ die C นำชิ้นทดสอบไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการดึงยืด ใช้ความเร็วในการทดสอบ 500 mm/min ตัวอย่างหนึ่งสูตรจะใช้ชิ้นทดสอบ 8 ชิ้น รายงานค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้ ค่าความเค้น ณ จุดคราก (yield stress, σ_y (MPa)) ค่าความเครียด ณ จุดคราก (yield strain, ϵ_y (%)) ค่าความเค้น ณ จุดขาด (stress at break, σ_b (MPa)) คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดทำการทดสอบเหมือนการทดสอบความทนต่อแรงดึง ค่าที่ได้จะวัดโดยการอ่านระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด รายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการยืดตัว หาได้จากสมการที่ 3.2

$$\sigma_b = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ในการดึงจนชิ้นทดสอบขาด (N)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (mm^2)

$$\epsilon_b (\%) = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ L คือ ระยะที่ชิ้นทดสอบยืดจนขาด (mm)
 L_0 คือ ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ (mm)

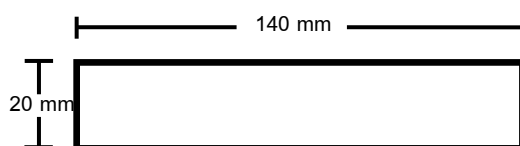


รูปที่ 3.1 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ (Die C) สำหรับการทดสอบความทนต่อแรงดึง

3.4.5 การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์ม (tensile properties of thin film testing)

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เป่าได้มาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 mm × 140 mm แสดงในรูปที่ 3.2 ทดสอบตัวอย่างทั้งในแนว

ตามเครื่องจักร (machine direction; MD) และในแนวขวางเครื่องจักร (transverse direction; TD) นำชิ้นทดสอบไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการดึงยืด ใช้ความเร็วในการทดสอบ 500 mm/min ระยะของการจับชิ้นงาน (gauge length) 50 mm ตัวอย่างหนึ่งสูตรจะใช้ชิ้นทดสอบ 8 ชิ้น รายงานค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้ ค่าความเค้น ณ จุดคราก ค่าความเครียด ณ จุดคราก ค่าความเค้น ณ จุดขาด และค่าความเครียด ณ จุดขาด



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.4.6 การทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance testing)

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D624 โดยนำพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปแล้วตัดชิ้นทดสอบแบบมุม แสดงในรูปที่ 3.3 นำชิ้นทดสอบไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการดึงยืด ใช้ความเร็วในการทดสอบ 500 mm/min ตัวอย่างหนึ่งสูตรจะใช้ชิ้นทดสอบ 8 ชิ้น บันทึกค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบฉีกขาด นำมาหารด้วยความหนาของชิ้นทดสอบ ได้เป็นค่าการต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength, N/mm)



รูปที่ 3.3 ชิ้นทดสอบแบบมุมสำหรับการทดสอบการฉีกขาด

3.4.7 การทดสอบความแข็ง (hardness testing)

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 เป็นการวัดค่าความแข็งแบบ shore A ใช้ชิ้นทดสอบที่มีความหนาน้อย 6 mm ก่อนการทดสอบทำการปรับเทียบ (calibration) เครื่องวัดความแข็ง โดยใช้แท่งเหล็กที่มีรูตรงกลางวางให้ตรงกับหัวเข็มกดของเครื่องทดสอบ แล้วปรับค่าที่หน้าปัดเป็นศูนย์ หลังจากนั้นนำแท่งเหล็กที่มีค่าความแข็ง 40 shore A วางบนฐานของเครื่องทดสอบ กดหัวกดลงบนแท่งเหล็กที่มีค่าความแข็ง 40 shore A อ่านค่าความแข็งค่าที่อ่านได้ควรจะเป็น 40 shore A เมื่อทำการปรับเทียบเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นทดสอบวางไว้ให้

ตรงกับหัวเข็มกด เลื่อนหัวเข็มกดลงมาให้กดลงบนพอลิเมอร์ผสมโดยใช้น้ำหนักกดคงที่ (1 kg) กดไว้เป็นเวลา 30 sec บันทึกค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตร

3.4.8 การทดสอบการกระเดັงตัว (rebound resilience testing)

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2632 เป็นการทดสอบด้วยการกระเดັงแนวตั้ง ใช้ชิ้นทดสอบที่มีความหนาอย่างน้อย 12.5 mm ทำการทดสอบโดยปล่อยตัวกระแทกกระทบ ชิ้นทดสอบ 6 ครั้งติดต่อกัน บันทึกการกระเดັงตัวเฉพาะครั้งที่ 4, 5 และ 6 ใช้ค่ากลางของการกระเดັงตัวในแต่ละชิ้นทดสอบเป็นผลการทดสอบ ตัวอย่างหนึ่งสูตรจะใช้ชิ้นทดสอบ 3 ชิ้น

3.4.9 การทดสอบสมบัติการยืดถาวร (tension set)

ทำการทดสอบสมบัติการยืดถาวร ตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยนำพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปแล้วตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ ใช้เครื่องตัดชิ้นทดสอบแบบ die C เช่นเดียวกับการทดสอบการทนต่อแรงดึง ทำเครื่องหมายไว้บนชิ้นตัวอย่าง โดยขีดเป็นเส้นให้ห่างกัน 35 mm จากนั้นยืดติดชิ้นตัวอย่างไว้กับที่จับชิ้นตัวอย่างของเครื่องทดสอบคุณสมบัติการดึง ดึงยืดชิ้นตัวอย่างด้วยความเร็ว 500 mm/min ให้มีความเครียด 100% และรักษาความเครียดนี้ไว้เป็นเวลา 10 min จากนั้นปล่อยชิ้นตัวอย่างให้กลับมาที่ระยะเดิมด้วยความเร็ว 100 mm/min (ภายในเวลา 30 sec) และเอาชิ้นตัวอย่างออกจากเครื่องทดสอบ วางชิ้นตัวอย่างไว้ 10 min ก่อนที่จะทำการวัดระยะของเครื่องหมายที่ทำไว้บนชิ้นตัวอย่าง บันทึกค่าที่วัดได้ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความยาวชิ้นตัวอย่างหรือค่าการยืดถาวร (tension set) ตามสูตรการคำนวณดังสมการที่ 3.3

$$\Delta P = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ ΔP เป็นค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความยาว

L เป็นระยะห่างของเครื่องหมายหลังดึงยืด

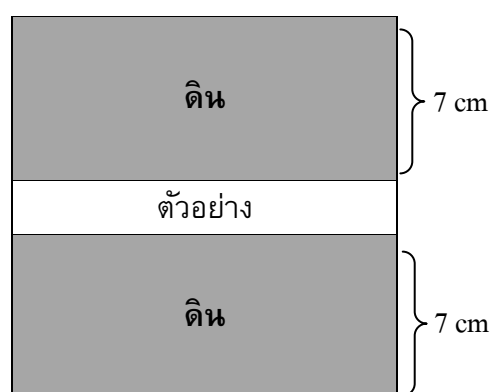
L_0 เป็นระยะห่างของเครื่องหมายก่อนดึงยืด

3.4.10 การทดสอบการเสื่อมสลายโดยการฝังดิน (soil burial test)

ทำการทดสอบการเสื่อมสลายของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยวิธีการฝังดิน เตรียมชิ้นทดสอบให้มีขนาดประมาณ 20 mm x 140 mm ฝังดินที่บรรจุในตะกร้าที่มีดินด้านล่างหนาประมาณ 7 cm เมื่อวางชิ้นทดสอบเรียบร้อยแล้วจึงกลบทับด้วยดินอีกประมาณ 7 cm และ

รูปที่ 3.4 แสดงภาพวาดความสูงของดินที่ใช้ในการทดสอบการเสื่อมสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดิน

ทำการทดสอบฝังดินเป็นระยะเวลา 180 วัน ตั้งแต่เดือนเมษายน 2554 – เดือนกันยายน 2554 โดยการวางตะกร้าที่ระเบียงนอกอาคาร เมื่อครบเวลาที่กำหนดเก็บชิ้นทดสอบที่ฝังดินมาทำความสะอาด ถ่ายรูปเพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบตามระยะเวลาต่างๆ และทำการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์



รูปที่ 3.4 ภาพวาดแสดงความสูงของดินทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง

3.4.11 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี (differential scanning calorimetry, DSC)

ทำการศึกษาหาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ โดยตัดตัวอย่างเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ในอลูมิเนียมแพน (aluminum pan) วิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 30 - 180°C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 10°C/min และใช้น้ำแข็งเป็นสารทำความเย็น คำนวณหาปริมาณผลึกของ PBAT กับพอลิเมอร์ผสม โดยค่าความร้อนของการหลอมเหลว (fusion heat, ΔH_f^0) ของผลึก PBAT 100% มีค่าเท่ากับ 114 J/g (Mohanty *et al.*, 2010) คำนวณหาปริมาณผลึกได้จากสมการ 3.4

3.4.12 การตรวจสอบความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม

เตรียมชิ้นงานโดยการตัดชิ้นงานขนาด กว้าง 1 cm และยาว 5 cm จุ่มตัวอย่างในไนโตรเจนเหลวประมาณ 6 hr และทำการหักทันที นำชิ้นงานที่หักแล้วแช่ด้วยโทลูอีนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 hr เพื่อสกัดเอาอนุภาคยางที่ผิวหน้าชิ้นงานออกไป อบชิ้นงานด้วย

ตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 hr ทำการเคลือบด้วยทองบนผิวหน้าของชิ้นทดสอบและนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

$$X_c = \left(\frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ X_c คือปริมาณผลึก (%)

ΔH_f คือค่าพลังงานความร้อนของการหลอมเหลวผลึก PBAT ในพอลิเมอร์

ผสม

ΔH_f^0 คือค่าพลังงานความร้อนของการหลอมเหลวผลึก PBAT 100%

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมเตรียมจาก PBAT ผสมยางธรรมชาติ การทดลองมี 4 ส่วน ได้แก่ อิทธิพลของเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม อิทธิพลของชนิดยาง อิทธิพลของการวัลคาไนซ์ยางและสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

4.1 อิทธิพลของเครื่องมือที่ใช้ในการผสม

เครื่องมือที่ใช้ในการผสมในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder, SSE) เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder, TSE) และเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer, I) ทำการศึกษาที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 20 wt% และ 50 wt% ในการผสมด้วยเครื่อง SSE และ TSE ได้ทำการแปรจำนวนรอบที่ใช้ในการอัดรีดคือ 1 – 3 รอบ รหัสตัวอย่างอธิบายในตารางที่ 4.1

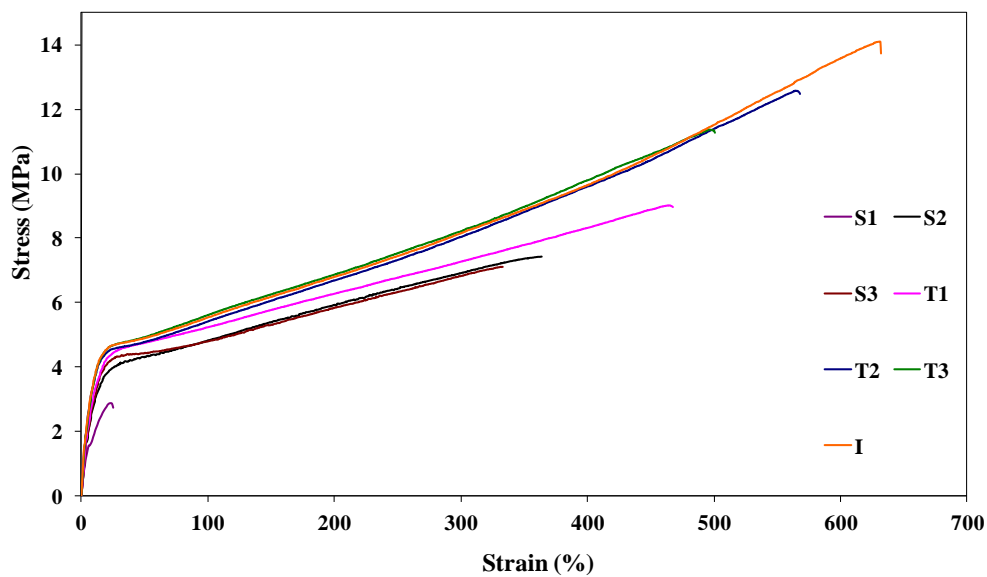
ตารางที่ 4.1 การเรียกชื่อสูตรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ

Code	Mixing Equipment	Number of extrusion
S1	Single screw extruder	1
S2	Single screw extruder	2
S3	Single screw extruder	3
T1	Twin screw extruder	1
T2	Twin screw extruder	2
T3	Twin screw extruder	3
I	Internal mixer	-

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ ที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 20 wt% แสดงในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อจำนวนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว 2 รอบ (S2) และ 3 รอบ (S3) ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งค่ามอดุลัส (modulus, E) ความเค้น ณ จุดคราก (yield stress, σ_y) ความเครียด ณ จุดคราก (yield strain, ϵ_y) ความเค้น ณ จุดขาด (stress at break, σ_b) และความเครียด ณ จุดขาด

(elongation at break, ϵ_b) แต่เมื่อเทียบกับการผสม 1 รอบ (S1) พบว่าให้ค่า E ลดลง ส่วนค่า σ_y , ϵ_y , σ_b และ ϵ_b มีค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนรอบการผสมเพิ่มขึ้นทำให้การผสมดีขึ้น โดยยางธรรมชาติกระจายตัวได้มากขึ้น และค่า ϵ_y มีค่าสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับค่า σ_y ที่สูงขึ้นเล็กน้อยส่งผลให้ค่า E ลดลง ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของ พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ พบว่า อนุภาคยางมีการกระจายตัวมากขึ้น ทำให้เกิดการกระจายแรงได้มากขึ้นส่งผลให้ค่า σ_y , ϵ_y , σ_b และ ϵ_b สูงขึ้น

การผสมด้วยเครื่อง TSE พบว่า การผสม 1 รอบ (T1) 2 รอบ (T2) และ 3 รอบ (T3) มีค่า σ_y และ ϵ_y มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่า E, σ_b และ ϵ_b ของ T1 น้อยกว่า T2 และ T3 แสดงให้เห็นว่าจำนวนรอบการผสมเพิ่มขึ้น ทำให้การผสมดีขึ้น เช่นเดียวกับการผสมด้วยเครื่อง SSE



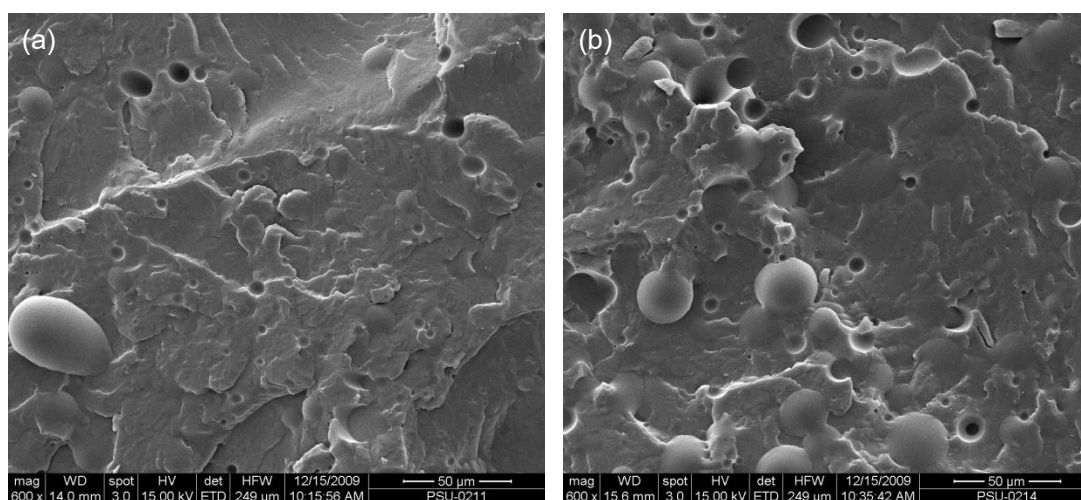
รูปที่ 4.1 กราฟความเค้น-ความเครียดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติ 20 wt% ที่ผสมด้วยเครื่องผสมต่างชนิดกัน

การผสมด้วยเครื่อง SSE และ TSE มีค่า E, σ_b และ ϵ_b น้อยกว่าการผสมด้วยเครื่อง I ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ โดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 20 wt% กำลังขยาย 600 เท่าแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า การผสมด้วยเครื่อง SSE และ TSE จำนวน 1 – 3 รอบมีการแยกเฟสอย่างชัดเจน มี PBAT เป็นเฟสต่อเนื่องและยางธรรมชาติเป็นเฟสกระจาย โดยอนุภาคยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นทรงกลม ยกเว้น S3 ที่ยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นทรงกระบอกและ T3 ที่ยางธรรมชาติบางส่วนมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ซึ่งอาจเกิดจากการกลับมารวมตัวกัน

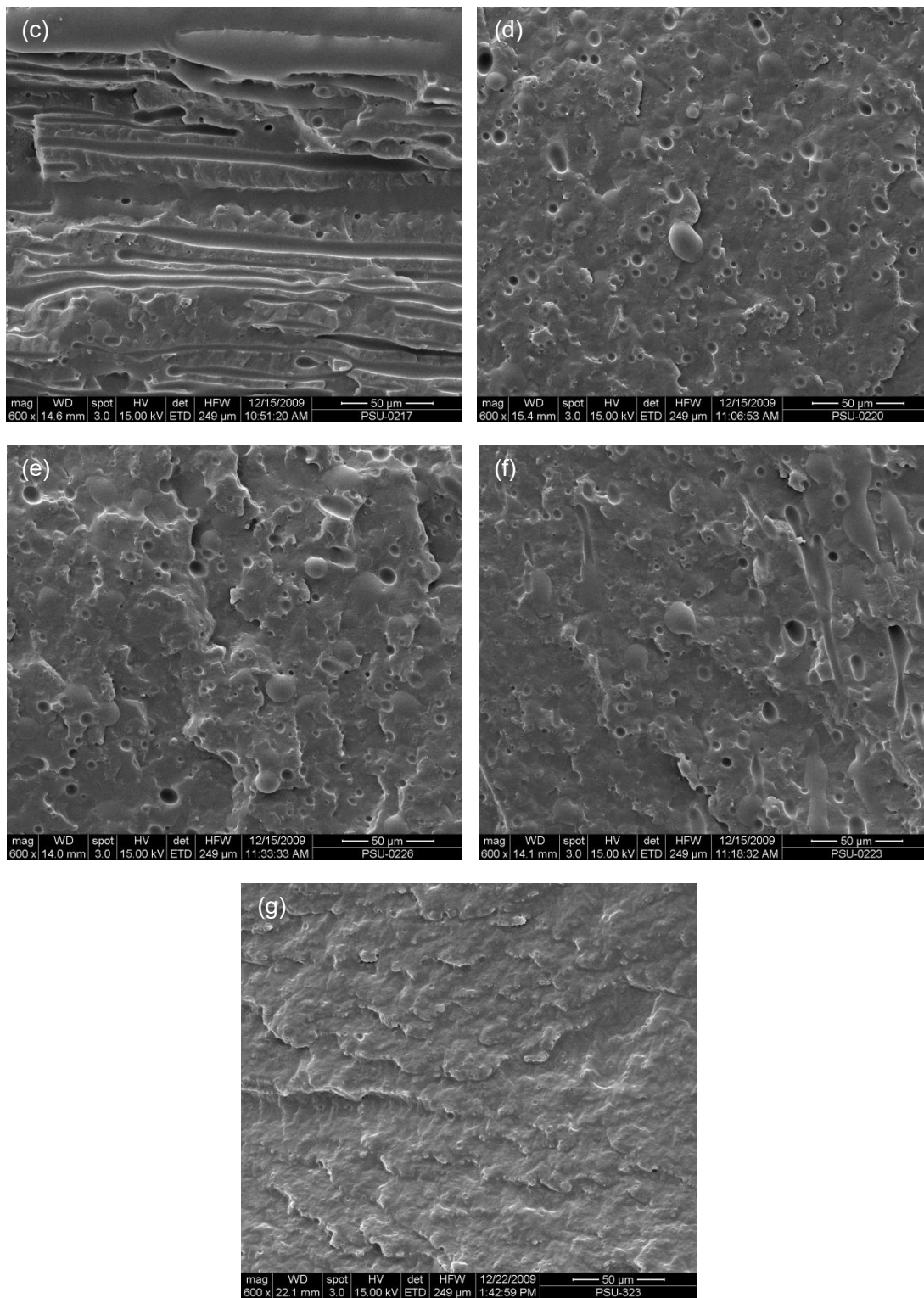
ใหม่ (coalescence) ของอนุภาคยางธรรมชาติ เมื่อถูกนำมาหลอมผสมใหม่ และการผสมด้วยเครื่อง I ไม่มีการแยกเฟสที่ชัดเจนของอนุภาคยางธรรมชาติกับ PBAT แสดงให้เห็นว่าการผสมด้วยเครื่อง I ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดีกว่าการผสมด้วย SSE และ TSE เนื่องจากตัวอย่างในรูปที่ 4.2 ไม่ได้ทำการสกัดผิวหน้าด้วยตัวทำละลาย (โทลูอีน) จึงอาจทำให้เห็นอนุภาคยางในตัวอย่าง I ได้ไม่ชัดเจน

ตารางที่ 4.2 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยางธรรมชาติ 20 wt% ที่ผสมด้วยเครื่องผสมต่างชนิดกัน

Code	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
S1	31.19 ± 4.95	2.84 ± 1.35	5.93 ± 1.47	3.27 ± 1.31	34 ± 19
S2	23.06 ± 1.06	4.09 ± 0.08	20.87 ± 1.50	8.50 ± 1.01	445 ± 78
S3	23.03 ± 1.14	4.39 ± 0.13	22.44 ± 1.89	8.76 ± 1.15	497 ± 72
T1	26.51 ± 2.81	4.52 ± 0.06	18.88 ± 1.64	8.53 ± 0.82	432 ± 76
T2	35.06 ± 2.52	4.49 ± 0.11	19.82 ± 4.26	12.28 ± 0.77	540 ± 24
T3	30.24 ± 1.26	4.42 ± 0.09	21.82 ± 1.39	11.39 ± 0.62	511 ± 29
I	32.58 ± 2.06	4.48 ± 0.11	19.75 ± 2.37	13.94 ± 1.24	642 ± 54



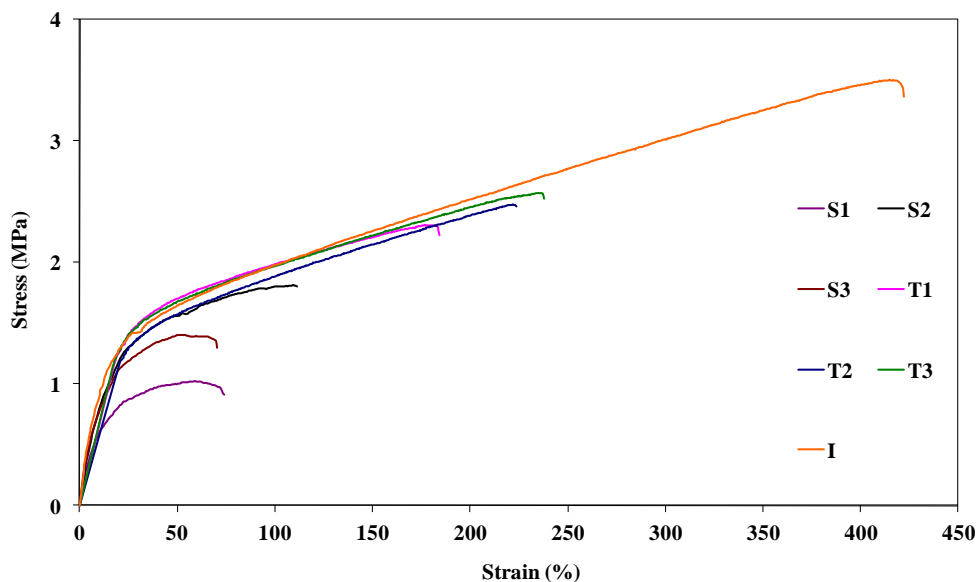
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 20 wt% ผสมด้วยเครื่องผสมต่างชนิดกันและจำนวนรอบการผสมต่างกัน: (a) S1 (b) S2 (c) S3 (d) T1 (e) T2 (f) T3 และ (g) I



รูปที่ 4.2 (ต่อ)

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ ที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 50 wt% แสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 พบว่า S2 และ S3 ให้ค่า E σ_y ϵ_y σ_b และ ϵ_b ใกล้เคียงกันและมากกว่า S1 แสดงให้เห็นว่า จำนวนรอบการผสมที่เพิ่มขึ้น ทำให้การผสมดีขึ้น โดยยางธรรมชาติกระจายตัวได้มากขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ พบว่า อนุภาคยางมีการกระจายตัวมากขึ้น ทำให้เกิดการกระจายแรงได้มากขึ้นส่งผลให้ค่า E σ_y ϵ_y σ_b และ ϵ_b สูงขึ้น

การผสมโดยใช้เครื่อง TSE พบว่า T1 T2 และ T3 มีค่า E σ_y ϵ_y σ_b และ ϵ_b แตกต่างกันเล็กน้อย และจากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าที่จำนวนรอบการผสมที่ต่างกัน มีการกระจายตัวของยางที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าจำนวนรอบการผสมที่มากขึ้นไม่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึง



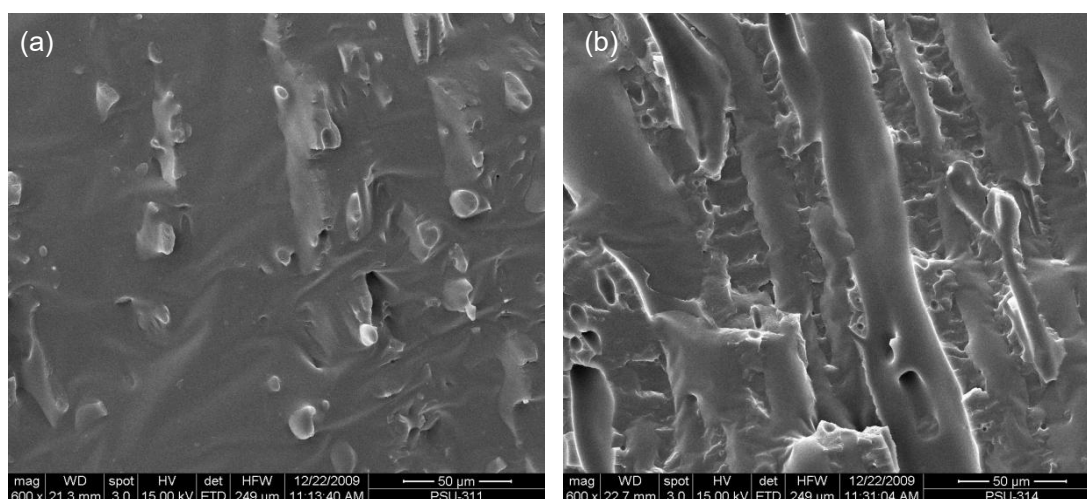
รูปที่ 4.3 กราฟความเค้น-ความเครียดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติ 50 wt% ที่ผสมด้วยเครื่องผสมต่างชนิดกัน

การผสมด้วยเครื่อง SSE และ TSE มีค่า E , σ_b และ ϵ_b น้อยกว่าการผสมด้วยเครื่อง I เช่นเดียวกับการผสมที่มีปริมาณยาง 20 wt% ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ โดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 50 wt% ที่กำลังขยาย 600 เท่า แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าการผสม PBAT กับยางธรรมชาติด้วยเครื่อง I มีลักษณะผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างเรียบกว่า SSE และ

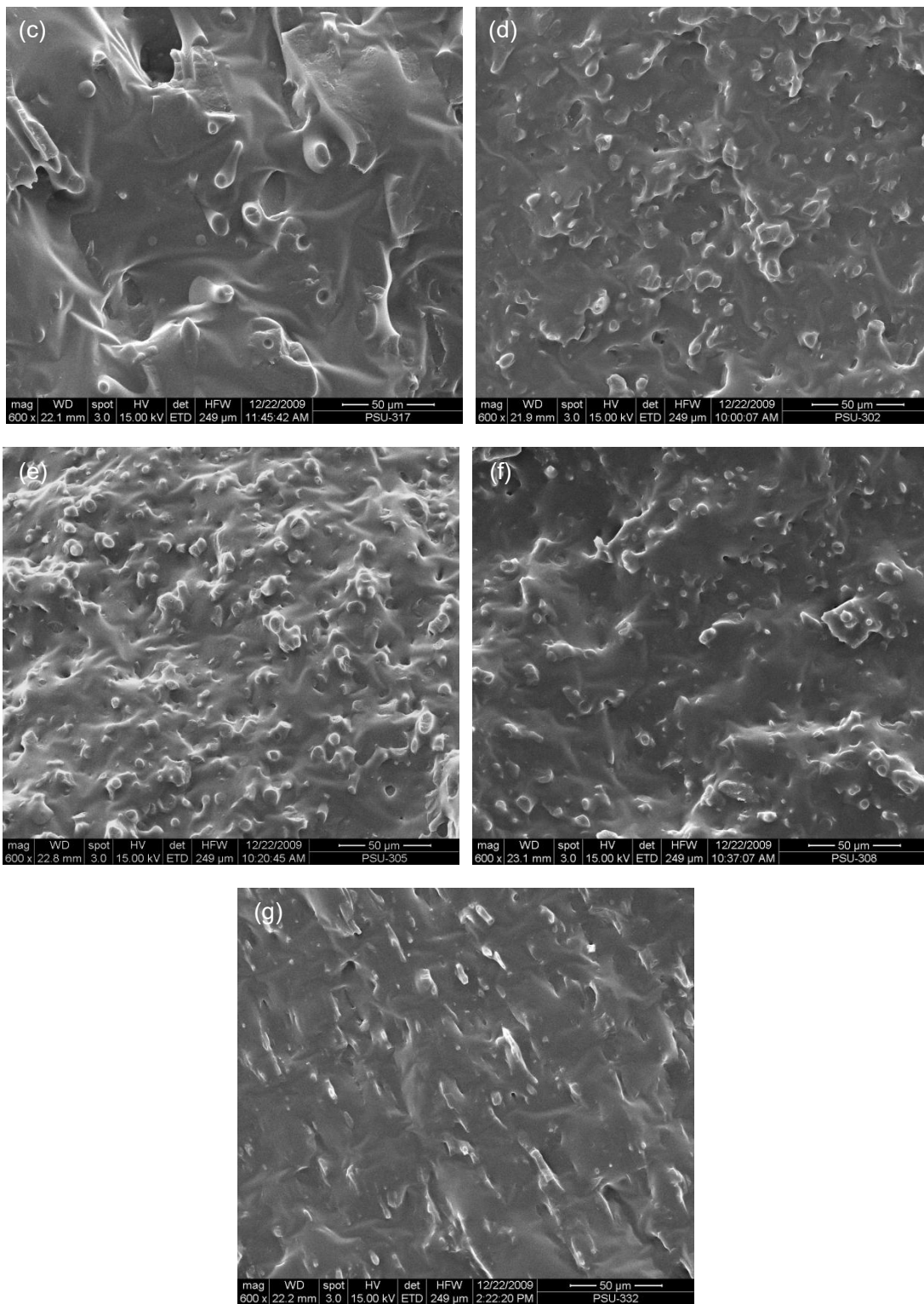
TSE แสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์ผสมที่ผสมด้วยเครื่อง I เข้ากันได้ดีกว่าการผสมด้วยเครื่อง SSE และ TSE เนื่องจากตัวอย่างในรูปที่ 4.4 ไม่ได้ทำการสกัดผิวหน้าด้วยตัวทำละลาย (โทลูอีน) จึงอาจทำให้เห็นอนุภาคภายในตัวอย่าง I ได้ไม่ชัดเจน

ตารางที่ 4.3 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยางธรรมชาติ 50 wt% ที่ผสมด้วยเครื่องผสมต่างชนิดกัน

Code	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
S1	5.53 ± 0.61	0.94 ± 0.15	18.88 ± 1.64	0.90 ± 0.15	61 ± 14
S2	6.73 ± 0.71	1.33 ± 0.27	19.82 ± 4.26	1.39 ± 0.48	109 ± 7
S3	6.76 ± 0.89	1.30 ± 0.18	21.82 ± 1.39	1.25 ± 0.35	83 ± 11
T1	6.24 ± 1.24	1.55 ± 0.16	25.26 ± 2.46	2.01 ± 0.30	162 ± 28
T2	6.25 ± 0.67	1.55 ± 0.08	25.01 ± 1.99	2.40 ± 0.23	243 ± 42
T3	6.33 ± 0.70	1.56 ± 0.08	24.73 ± 1.81	2.28 ± 0.38	232 ± 37
I	10.33 ± 0.79	1.49 ± 0.14	15.60 ± 0.86	3.21 ± 0.17	375 ± 41



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่างที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 50 wt% ผสมด้วยเครื่องผสมต่างชนิดกันและจำนวนรอบการผสมต่างกัน: (a) S1 (b) S2 (c) S3 (d) T1 (e) T2 (f) T3 และ (g) I



รูปที่ 4.4 (ต่อ)

ความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าที่ปริมาณยางธรรมชาติ 20 wt% ชนิดของเครื่องผสมและจำนวนรอบของการผสมไม่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 67 – 70 N/mm ยกเว้นตัวอย่าง S1 ที่มีค่าต่ำมาก และที่ปริมาณยางธรรมชาติ 50 wt% พบว่า ชนิดของเครื่องผสมและจำนวนรอบของการผสมไม่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด เช่นเดียวกับที่ปริมาณยางธรรมชาติ 20 wt% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 23 – 27 N/mm ยกเว้นตัวอย่าง S1 และ S3 ที่มีค่าน้อยกว่า จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เครื่องมือที่ใช้ในการผสมที่ต่างกันไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ

ตารางที่ 4.4 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติ 20 wt% และ 50 wt% ที่ผสมด้วยเครื่องผสมต่างชนิดกัน

Code	Tear strength (N/mm)	
	20 wt% NR	50 wt% NR
S1	32 ± 1	19 ± 6
S2	69 ± 2	25 ± 3
S3	70 ± 3	19 ± 1
T1	70 ± 3	23 ± 3
T2	69 ± 0	26 ± 2
T3	67 ± 2	25 ± 2
I	68 ± 3	27 ± 2

จากผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ปริมาณยาง 20 wt% และ 50 wt% ให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกันคือ การผสมด้วยเครื่อง I ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติความทนต่อแรงดึงมากกว่าการผสมด้วยเครื่อง SSE และ TSE โดยที่ปริมาณยางธรรมชาติ 50 wt% ให้ผลการทดสอบที่ต่ำกว่าที่ปริมาณยางธรรมชาติ 20 wt% แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณยางมากขึ้น ทำให้รอยต่อระหว่างเฟสมีมากกว่า ซึ่งรอยต่อระหว่างเฟสนี้เป็นเหมือนจุดอ่อนของพอลิเมอร์ผสม เมื่อได้รับแรงกระทำทำให้เกิดการแตกหักหรือฉีกขาดได้ง่ายกว่า ที่ปริมาณยาง 20% ที่มีปริมาณรอยต่อระหว่างเฟสน้อยกว่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เครื่อง I ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

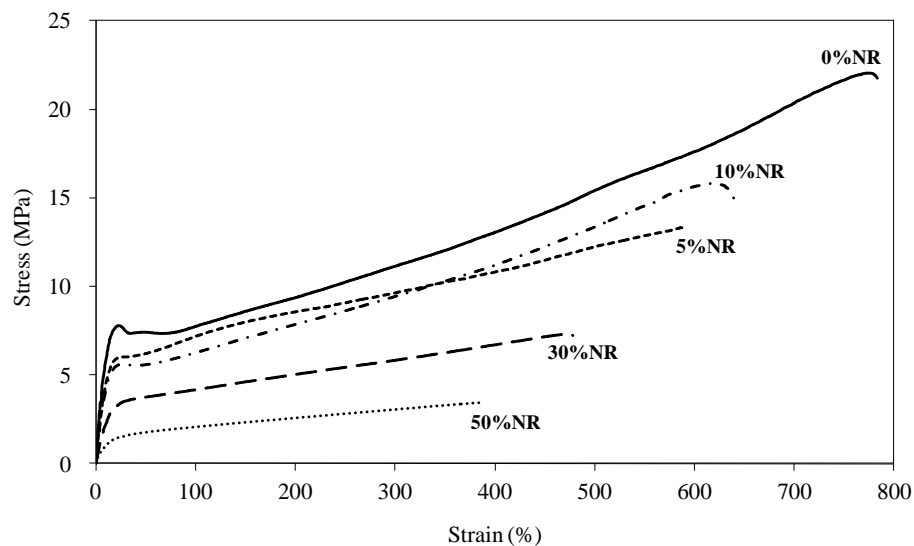
4.2 อิทธิพลของปริมาณยาง

4.2.1 ยางไม้วัลคาไนซ์

4.2.1.1 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.5 พบว่า ค่า E σ_y ϵ_y σ_b และ ϵ_b ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติน้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ และที่ปริมาณยางธรรมชาติ 10 wt% มีค่า E มากกว่าที่ปริมาณยางธรรมชาติ 5 wt% และเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 wt% ค่า E ลดลง เนื่องจากโดยธรรมชาติยางธรรมชาติมีค่า E ต่ำและเมื่อนำมาผสมกับพลาสติกที่มีค่า E สูงกว่า จึงทำให้ค่า E ลดลง ค่า σ_b ที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% มีค่าใกล้เคียงกันและค่า σ_b ลดลง เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า σ_b ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติขึ้นกับความแข็งแรงของ PBAT ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณผลึก (degree of crystallinity) ของ PBAT เมื่อเติมยางธรรมชาติเข้าไปทำให้ปริมาณผลึกลดลง ค่า σ_b จึงลดลงด้วย สอดคล้องกับปริมาณผลึกที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี (differential scanning calorimetry, DSC) แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยางธรรมชาติน้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ ที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% มีปริมาณผลึกใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกลดลง เนื่องจากโมเลกุลยางขัดขวางการเกิดนิวคลีไอ (nuclei) ของผลึก PBAT ในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ปริมาณผลึกลดลง ค่า σ_b จึงลดลงด้วย โดยมีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumar และคณะ (Kumar *et al.*, 1996) พบว่า ค่า σ_b ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอนกับยาง NBR ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเมทริกซ์ไนลอน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณผลึกของเฟสไนลอน เมื่อเติมยางเข้าไปทำให้ปริมาณผลึกลดลง ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC พบว่า ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมลดลง เมื่อปริมาณยาง NBR เพิ่มขึ้น ดังนั้นการลดลงของสมบัติเชิงกล เมื่อปริมาณยาง NBR เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการลดลงของปริมาณผลึก และอีกสาเหตุหนึ่งอาจจะมาจากอนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความเข้มข้นของความเค้น (stress concentration) สูงขึ้น จึงแตกหักได้เร็วขึ้น สำหรับค่า ϵ_b ที่ปริมาณยาง 5 wt% น้อยกว่าที่ปริมาณยาง 10 wt% ซึ่งจากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่าที่ปริมาณยาง 10 wt% มีขนาดอนุภาคของยางเล็กกว่าและมีการกระจายมากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณยาง 10 wt% มีความเข้ากันได้มากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% ทำให้ที่ปริมาณยาง 10 wt% มีค่า ϵ_b มากกว่าที่ปริมาณยาง

5 wt% และค่า ϵ_b ลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคยางธรรมชาติที่กระจายอยู่ใน PBAT มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น และยางธรรมชาติมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ทำให้การยึดติดระหว่างเฟสทั้งสองลดลง ส่งผลให้ค่า ϵ_b มีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ George และคณะ (George *et al.*, 1995) ที่ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) กับยาง NBR พบว่าค่า ϵ_b ลดลงเมื่อปริมาณยาง NBR เพิ่มขึ้น เนื่องจากการยึดติดระหว่าง PP กับยาง NBR ไม่ดี และผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงยังสอดคล้องกับผลการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.5 กราฟความเค้น-ความเครียดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

เมื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของ PBAT ผสมยางธรรมชาติ โดยทำการแปรปริมาณยางธรรมชาติ 5 wt% 10 wt% 30 wt% และ 50 wt% และส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ลักษณะผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างเรียบ ไม่สามารถแยกเฟสของ PBAT และยางธรรมชาติได้ แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมน่าจะเข้ากันได้ดีในระดับหนึ่ง เนื่องจากไม่สามารถมองเห็นอนุภาคของยางธรรมชาติได้ เช่นเดียวกับรูปที่ 4.2 (g) จึงทำการสกัดเฟสยางธรรมชาติออกจากตัวอย่างโพลีเอทิลีนได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า มีการกระจายของเฟสยางธรรมชาติอยู่ในเฟสของ PBAT และมีลักษณะสัณฐานวิทยา ดังนี้ ที่ปริมาณยางธรรมชาติ 5 wt% และ 10 wt% ลักษณะอนุภาคยางธรรมชาติที่ถูกสกัดมีลักษณะค่อนข้างกลม กระจายทั่วไปในเฟสของ PBAT ซึ่งค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยางธรรมชาติแสดงในตารางที่ 4.7 และปริมาณยางธรรมชาติ 30 wt% ลักษณะ

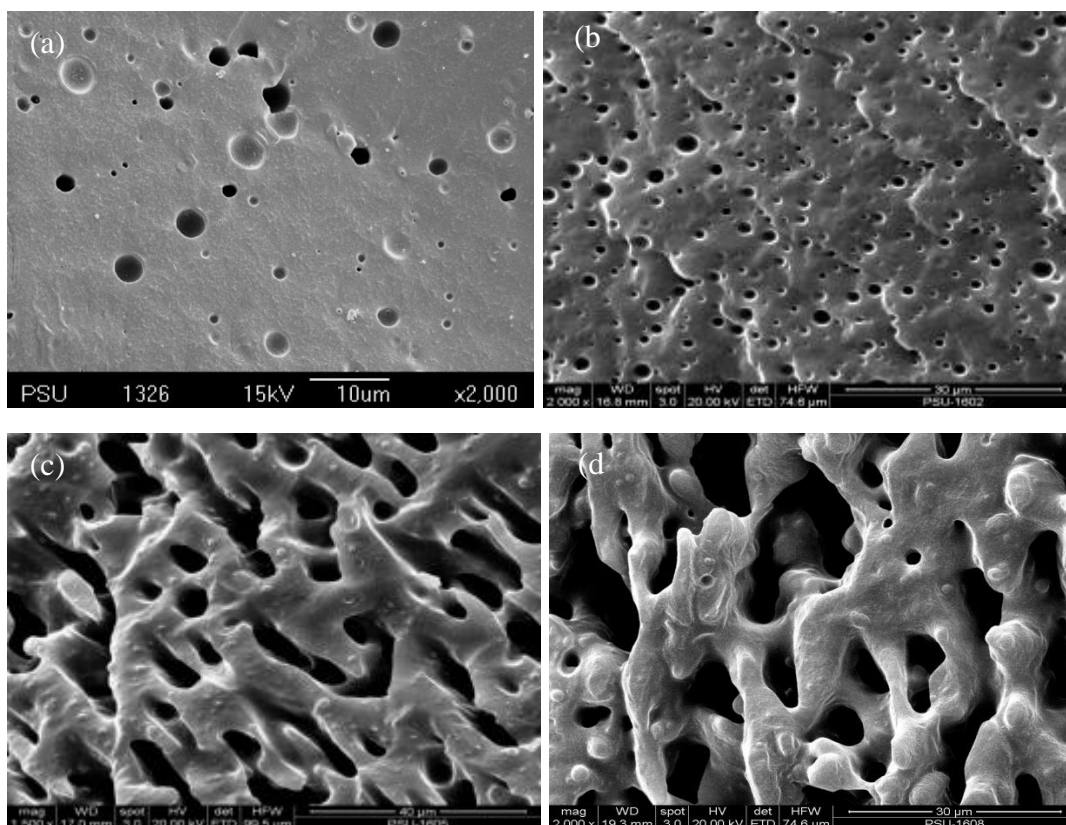
ยางธรรมชาติมีลักษณะคล้ายทรงกระบอก เนื่องจากยางธรรมชาติรวมตัวกันมากขึ้น จึงเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเฟสต่อเนื่อง และที่ปริมาณยางธรรมชาติ 50 wt% จะเห็นเฟสของยางธรรมชาติที่ถูกสกัดออกไป มีลักษณะเป็นโพรงและพบว่าอนุภาคของยางธรรมชาติที่กระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องของ PBAT มีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ อาจเป็นไปได้ว่าสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแบบเฟสต่อเนื่องร่วม (co-continuous phase) นั้น แสดงว่า เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติมีขนาดใหญ่มากขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของความเค้นสูงขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu และคณะ (Wu *et al.*, 2012) ที่ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับ cellulose acetate (CA) พบว่าค่า σ_b และ ϵ_b ของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อปริมาณ CA เพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่ดีของ CA ใน PBAT เมทริกซ์และ CA มีแนวโน้มกลับมารวมตัวกัน แสดงความเข้ากันได้ไม่ดีระหว่างทั้งสองเฟส

ตารางที่ 4.5 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

NR content (wt%)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
0	60.65 ± 1.71	7.79 ± 0.10	23.42 ± 0.56	21.73 ± 0.47	778 ± 8
5	39.30 ± 1.88	5.91 ± 0.18	12.52 ± 0.53	13.02 ± 0.84	566 ± 55
10	42.96 ± 2.46	5.41 ± 0.15	13.37 ± 0.98	14.95 ± 1.17	609 ± 66
30	17.03 ± 1.62	3.56 ± 0.11	22.69 ± 2.36	7.78 ± 0.63	527 ± 60
50	10.33 ± 0.79	1.49 ± 0.14	15.60 ± 0.86	3.21 ± 0.17	375 ± 41

ตารางที่ 4.6 ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 50 wt%

NR content (wt%)	T_m (°C)	ΔH_f (J/g)	Degree of crystallinity (%)
0	114.70	17.66	15.49
5	122.20	8.87	7.78
10	122.03	9.11	7.99
30	121.20	7.51	6.59



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ ทำการสกัดเอาเฟสยางออก: (a) ปริมาณยาง 5 wt% (b) ปริมาณยาง 10 wt% (c) ปริมาณยาง 30 wt% และ (d) ปริมาณยาง 50 wt%

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยางธรรมชาติใน PBAT ผสมยางธรรมชาติ

NR content (wt%)	Average diameter (μm)
5	1.44 ± 0.98
10	0.92 ± 0.46
30	2.10 ± 0.87

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 50 wt% แสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติน้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 5 wt% และ 10 wt% มีความต้านทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกัน และเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 wt%

ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง เนื่องจากความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของ PBAT ซึ่งขึ้นกับปริมาณผลึกของ PBAT เมื่อเติมยางเข้าไปทำให้ ปริมาณผลึกลดลง ความแข็งแรงของ PBAT ลดลง ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ George และคณะ (George *et al.*, 1996) พบว่า ความต้านทาน ต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยาง NBR กับพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) ลดลง เมื่อปริมาณยาง NBR เพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยาง NBR ผสม PP ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของ PP ซึ่งขึ้นกับปริมาณผลึก การเติมยาง NBR ลงไปใน PP เป็นการ ลดปริมาณผลึกของ PP ทำให้ความแข็งแรงลดลง ความต้านทานต่อการฉีกขาดจึงลดลงด้วย และอีกสาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากความเข้ากันได้ระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติที่ลดลง ซึ่งจาก การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่า เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ผสมมี ความเข้ากันได้ได้น้อยลง ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงด้วย ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้อง กับผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง

ตารางที่ 4.8 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

NR content (wt%)	Tear strength (N/mm)
0	104 ± 1
5	77 ± 2
10	83 ± 2
30	52 ± 2
50	27 ± 2

สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติที่มี ปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในตารางที่ 4.9 พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% มีค่าความแข็งแรง ไกล่เคียงกับ PBAT บริสุทธิ์ เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมลดลง เป็น ผลมาจากปริมาณ PBAT ลดลง ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสม สอดคล้องกับงานวิจัย ของ El-Sabbagh (El-Sabbagh *et al.*, 2008) พบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณอะโร- มาติกพอลิเอสเทอร์ (aromatic polyester, AP) เพิ่มขึ้นเนื่องจากความแข็งแรงของ AP สำหรับการ ทดสอบการกระด้างตัวพบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% มีค่าการกระด้างตัวใกล้เคียงกับ PBAT บริสุทธิ์ เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น มีค่าการกระด้างตัวลดลง เนื่องจากปริมาณยางที่ เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถดูดซับได้มากขึ้น การปล่อยแรงจึงลดลง ทำให้ค่าการกระด้างตัวลดลง

สำหรับการทดสอบการยืดถาวรเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เหลืออยู่หลังจากปล่อยแรงที่กระทำให้พอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เพื่อประเมินความสามารถในการคืนสู่รูปร่างเดิมของพอลิเมอร์ พบว่า เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรของ PBAT บริสุทธิ์สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม แสดงว่า PBAT บริสุทธิ์สามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้น้อยกว่าพอลิเมอร์ผสม และที่ปริมาณยางธรรมชาติ 5 wt% และ 10 wt% มีเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรที่ใกล้เคียงกัน และเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติมีความเป็นอีลาสติกสูง สามารถยืดและหดกลับสู่รูปร่างเดิมได้ ดังนั้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น จึงทำให้สามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรจึงมีค่าลดลง

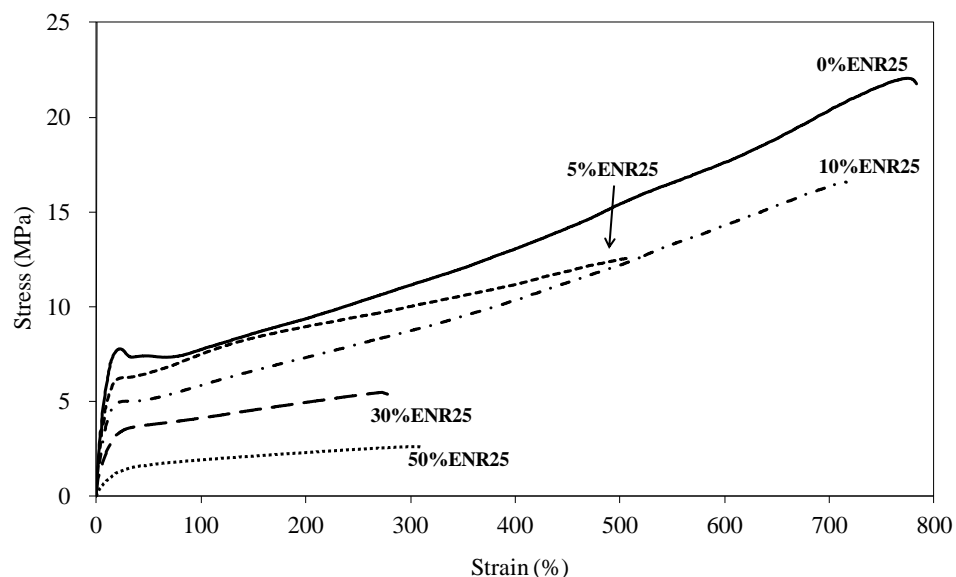
ตารางที่ 4.9 สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

NR content (wt%)	Hardness (shore A)	Rebound resilience (%)	Tension set (%)
0	91 ± 1	52 ± 1	47.44 ± 1.56
5	92 ± 1	53 ± 1	45.19 ± 0.73
10	87 ± 1	40 ± 2	44.50 ± 1.36
30	79 ± 1	37 ± 1	39.49 ± 1.52
50	57 ± 1	35 ± 3	41.95 ± 0.94

4.2.1.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง ENR25 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.10 พบว่า ค่า E σ_y ϵ_y σ_b และ ϵ_b ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ค่า E และ σ_y ลดลง เนื่องจากโดยธรรมชาติยาง ENR25 มีค่า E ต่ำและเมื่อนำมาผสมกับพลาสติกที่มีค่า E สูงกว่า จึงทำให้ค่า E ลดลง ที่ปริมาณยาง 10 wt% มีค่า σ_b และ ϵ_b มากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% ซึ่งจากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่า ที่ปริมาณยาง 10 wt% มีขนาดของอนุภาคยางเล็กกว่าและมีการกระจายตัวมากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณยาง 10 wt% เข้ากันได้ดีกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% ทำให้ที่ปริมาณยาง 10 wt% มีค่า σ_b และ ϵ_b มากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ค่า σ_b

และค่า ϵ_b ลดลง เนื่องจากค่า σ_b ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 ขึ้นกับความแข็งแรงของ PBAT ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณผลึกของ PBAT เมื่อเติมยางเข้าไปทำให้ปริมาณผลึกลดลง ค่า σ_b จึงลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลึกที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC แสดงในตารางที่ 4.11 พบว่า ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยาง ENR25 น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ และเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกลดลง เนื่องจากโมเลกุลยางขัดขวางการเกิดนิวเคลียสของผลึก PBAT ในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ปริมาณผลึกลดลง ค่า σ_b จึงลดลงด้วย และอีกสาเหตุหนึ่งน่าจะมาจากอนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความเข้มข้นของความเค้นสูงขึ้น จึงแตกหักได้เร็วขึ้น ซึ่งคาดว่าสาเหตุจากการที่อนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีอิทธิพลกับค่า σ_b มากกว่าปริมาณผลึกเนื่องจากที่ปริมาณยาง 10 wt% มีปริมาณผลึกน้อยกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% แต่มีค่า σ_b มากกว่า แสดงให้เห็นว่าสาเหตุหลักที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยาง 10 wt% มีค่า σ_b มากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% คือความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม และค่า ϵ_b ลดลงเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคยางที่กระจายอยู่ใน PBAT มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น และยางมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ทำให้การยึดติดระหว่างเฟสทั้งสองลดลง ส่งผลให้สมบัติความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลง ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25



รูปที่ 4.7 กราฟความเค้น-ความเครียดของ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง ENR25 0 – 50 wt%

ตารางที่ 4.10 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

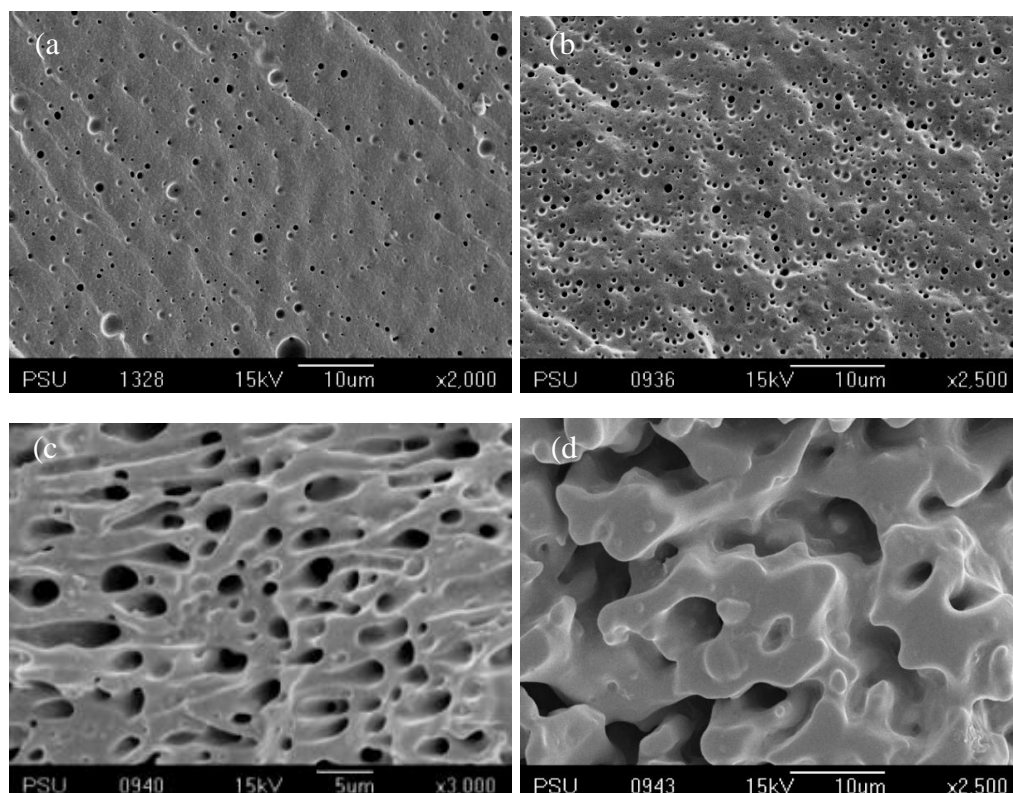
ENR25 content (wt%)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
0	60.65 ± 1.71	7.79 ± 0.10	23.42 ± 0.56	21.73 ± 0.47	778 ± 8
5	57.68 ± 3.66	5.93 ± 0.18	10.08 ± 0.98	12.69 ± 0.41	507 ± 24
10	40.88 ± 4.55	4.73 ± 0.07	12.82 ± 2.06	16.07 ± 1.03	703 ± 52
30	18.06 ± 1.72	3.31 ± 0.13	23.21 ± 2.20	5.29 ± 0.54	282 ± 45
50	7.61 ± 0.62	1.53 ± 0.10	21.71 ± 1.84	2.35 ± 0.25	306 ± 38

ตารางที่ 4.11 ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง ENR25 0 – 30 wt%

ENR25 content (wt%)	T_m (°C)	ΔH_f (J/g)	Degree of crystallinity (%)
0	114.70	17.66	15.49
5	121.70	11.44	10.04
10	120.20	9.21	8.07
30	122.36	7.34	6.44

เมื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของ PBAT ผสมยาง ENR25 โดยทำการแปรปริมาณยาง 5 wt% 10 wt% 30 wt% และ 50 wt% และส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ลักษณะผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างเรียบ ไม่สามารถแยกเฟสของ PBAT และยาง ENR25 ได้ แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมน่าจะเข้ากันได้ดีในระดับหนึ่ง เนื่องจากไม่สามารถมองเห็นอนุภาคของยางได้เช่นเดียวกับรูปที่ 4.2 (g) จึงทำการสกัดเฟสยางออกด้วยโทลูอีนได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า มีการกระจายของเฟสยางที่ถูกสกัดออกอยู่ในเฟสของ PBAT และมีลักษณะสัณฐานวิทยาดังนี้ โดยที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% ลักษณะอนุภาคยางที่ถูกสกัดมีลักษณะค่อนข้างกลม กระจายอย่างทั่วถึงในเฟสของ PBAT ซึ่งค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยางแสดงในตารางที่ 4.12 และปริมาณยาง 30 wt% อนุภาคยางมีลักษณะคล้ายทรงกระบอก เนื่องจากยางมีการรวมตัวกันมากขึ้น จึงเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเฟสต่อเนื่อง และที่ปริมาณยาง 50 wt% จะเห็นเฟสของยางถูกสกัดออกไปมีลักษณะเป็นโพรงและพบว่าอนุภาคของยางกระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องของ PBAT มีขนาด

ค่อนข้างใหญ่ อาจเป็นไปได้ว่าสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแบบเฟสต่อเนื้อรวม นั้นแสดงว่า เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคของยางขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ทำให้ความเข้มข้นของความเค้นสูงขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงด้วย



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 ทำการสกัดเอาเฟสยางออก: (a) ปริมาณยาง 5 wt% (b) ปริมาณยาง 10 wt% (c) ปริมาณยาง 30 wt% และ (d) ปริมาณยาง 50 wt%

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในตารางที่ 4.13 พบว่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ ที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกัน และเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 wt% ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง เนื่องจากความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของ PBAT ซึ่งขึ้นกับปริมาณผลึกของ PBAT เมื่อเติมยางเข้าไปทำให้ปริมาณผลึกลดลง ความแข็งแรงของ PBAT ลดลง ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงด้วย และอีกสาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากความเข้ากันได้ระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 ที่ลดลง ซึ่งจากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่า เมื่อปริมาณ

ยางเพิ่มขึ้น โพลีเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้น้อยลง ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงด้วย ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง

ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยางธรรมชาติใน PBAT ผสมยาง ENR25

ENR25 content (wt%)	Average diameter (μm)
5	0.42 ± 0.27
10	0.36 ± 0.17
30	1.50 ± 0.61

ตารางที่ 4.13 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ENR25 content (wt%)	Tear strength (N/mm)
0	104 ± 1
5	81 ± 2
10	80 ± 1
30	51 ± 1
50	24 ± 1

สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในตารางที่ 4.14 พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% มีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกับ PBAT บริสุทธิ์ เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงของโพลีเมอร์ผสมลดลง อาจเป็นผลมาจากปริมาณ PBAT ลดลง ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของโพลีเมอร์ผสม สำหรับการทดสอบการกระด้างตัวของ PBAT บริสุทธิ์และ PBAT ผสมยาง ENR25 มีค่าใกล้เคียงกันทุกสัดส่วน โดยมีค่าการกระด้างตัวอยู่ในช่วง 48 – 54% แสดงให้เห็นว่าปริมาณยาง ENR25 ไม่มีอิทธิผลกับการกระด้างตัวของโพลีเมอร์ผสม สำหรับผลการทดสอบการยืดถาวรพบว่า เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรของ PBAT บริสุทธิ์สูงกว่าโพลีเมอร์ผสม แสดงว่า PBAT บริสุทธิ์สามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้น้อยกว่าโพลีเมอร์ผสม และเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรลดลง เนื่องจากยางมีความเป็นอีลาสติกสูง สามารถยืดและหดกลับสู่รูปร่างเดิมได้ ดังนั้นเมื่อปริมาณยางในโพลีเมอร์ผสมมากขึ้น จึงทำให้สามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรจึงมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.14 สมบัติกายภาพของ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

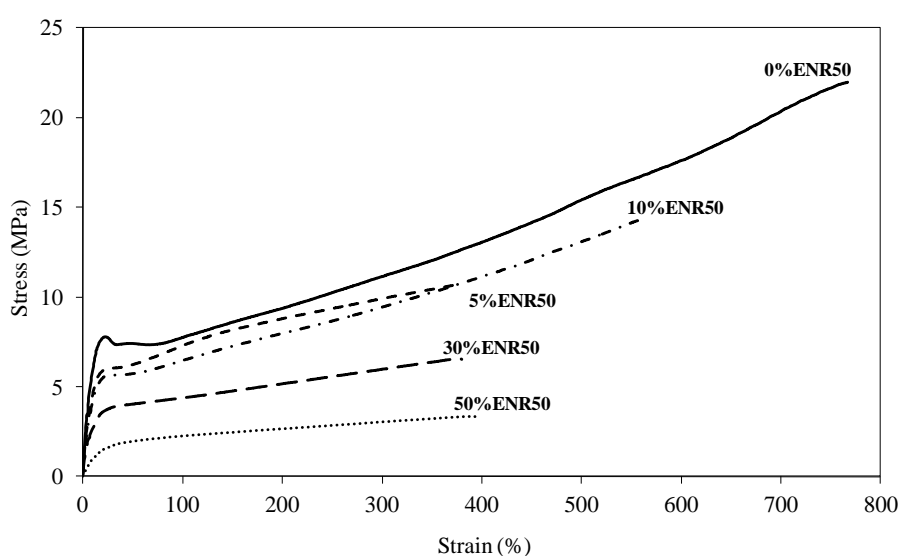
ENR25 content (wt%)	Hardness (shore A)	Rebound resilience (%)	Tension set (%)
0	91 ± 1	52 ± 1	47.44 ± 1.56
5	94 ± 1	54 ± 1	43.96 ± 0.40
10	85 ± 1	54 ± 1	41.92 ± 0.50
30	83 ± 1	50 ± 2	41.30 ± 1.70
50	63 ± 2	48 ± 1	32.81 ± 1.94

4.2.1.3 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR50

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.15 พบว่า ค่า E , σ_y , ϵ_y , σ_b และ ϵ_b ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR50 น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ค่า E และ σ_y ลดลง เนื่องจากโดยธรรมชาติยางมีค่า E ต่ำและเมื่อนำมาผสมกับพลาสติกที่มีค่า E สูงกว่า จึงทำให้ค่า E ลดลง ที่ปริมาณยาง 10 wt% มีค่า σ_b และ ϵ_b มากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% ซึ่งจากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่า ที่ปริมาณยาง 10 wt% มีขนาดของอนุภาคยางเล็กกว่าและมีการกระจายตัวมากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณยาง 10 wt% เข้ากันได้ดีกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% ทำให้ที่ปริมาณยาง 10 wt% มีค่า σ_b และ ϵ_b มากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ค่า σ_b และค่า ϵ_b ลดลง เนื่องจาก σ_b ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR50 ขึ้นกับความแข็งแรงของ PBAT ซึ่งขึ้นอยู่กับผลึกของ PBAT เมื่อเติมยางเข้าไปทำให้ปริมาณผลึกลดลง ค่า σ_b จึงลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลึกที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC แสดงในตารางที่ 4.16 พบว่า ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยาง ENR50 น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ และเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกลดลง เนื่องจากโมเลกุลยางขัดขวางการเกิดนิวคลีไอ (nuclei) ของผลึก PBAT ในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ปริมาณผลึกลดลง ค่า σ_b จึงลดลงด้วย และอีกสาเหตุหนึ่งน่าจะมาจากอนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความเข้มข้นของความเค้นสูงขึ้น จึงแตกหักได้เร็วขึ้น ซึ่งคาดว่าสาเหตุจากการที่อนุภาคยางมีขนาดใหญ่ น่าจะมีอิทธิพลกับค่า σ_b มากกว่าปริมาณผลึกเนื่องจากที่ปริมาณยาง 10 wt% มีปริมาณผลึกน้อยกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% แต่มีค่า σ_b มากกว่า แสดงให้เห็นว่าสาเหตุหลักที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยาง 10 wt% มีค่า σ_b มากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% คือความเข้ากันได้

ของพอลิเมอร์ผสมเช่นเดียวกับ PBAT ผสมยาง ENR25 และค่า ϵ_b ลดลงเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคยางที่กระจายอยู่ใน PBAT มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ทำให้การยึดติดระหว่างเฟสทั้งสองลดลง ส่งผลให้สมบัติความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลง ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการตรวจสอบลักษณะสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR50

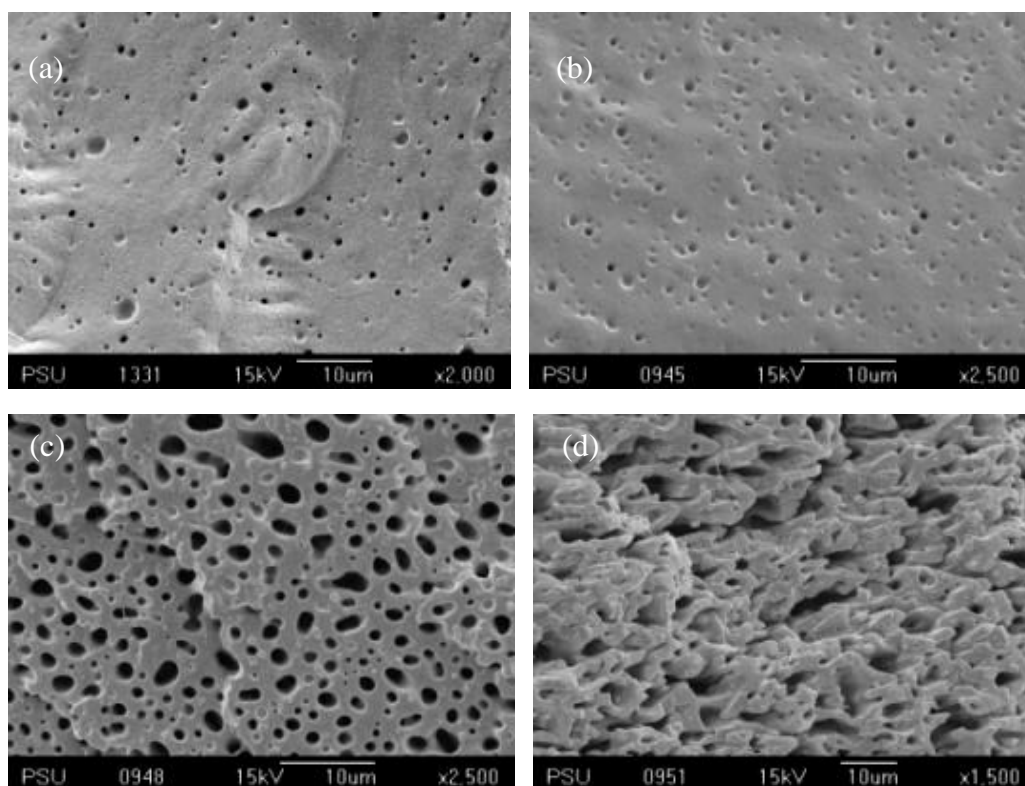
เมื่อศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยาของ PBAT ผสมยาง ENR50 โดยทำการแปรปริมาณยาง 5 wt% 10 wt% 30 wt% และ 50 wt% และส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า ลักษณะผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างเรียบ ไม่สามารถแยกเฟสของ PBAT และยาง ENR50 ได้ แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมน่าจะเข้ากันได้ดีในระดับหนึ่ง เนื่องจากไม่สามารถมองเห็นอนุภาคของยางได้ เช่นเดียวกับรูปที่ 4.2 (g) จึงทำการสกัดเฟสยางออกด้วยโทลูอีนได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า มีการกระจายของเฟสยางที่ถูกสกัดออกอยู่ในเฟสของ PBAT และมีลักษณะสัญญาณวิทยาดังนี้ โดยที่ปริมาณยาง 5 wt% 10 wt% และ 30 wt% ลักษณะอนุภาคยางที่ถูกสกัดมีลักษณะค่อนข้างกลม กระจายอย่างทั่วถึงในเฟสของ PBAT ซึ่งค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยางแสดงในตารางที่ 4.17 และที่ปริมาณยางธรรมชาติ 50 wt% จะเห็นเฟสของยางธรรมชาติที่ถูกสกัดออกไป มีลักษณะเป็นโพรงและพบว่าอนุภาคของยางธรรมชาติที่กระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องของ PBAT มีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ อาจเป็นไปได้ว่าสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแบบเฟสต่อเนื่องร่วม นั้นแสดงว่า เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคของยางมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ทำให้ความเข้มข้นของเค้นสูงขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงด้วย



รูปที่ 4.9 กราฟความเค้น-ความเครียดของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง ENR50 0 – 50 wt%

ตารางที่ 4.15 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ENR50 content (wt%)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
0	60.65 ± 1.71	7.79 ± 0.10	23.42 ± 0.56	21.73 ± 0.47	778 ± 8
5	57.62 ± 2.54	5.86 ± 0.16	9.54 ± 0.46	10.72 ± 0.71	378 ± 60
10	48.36 ± 1.78	5.07 ± 0.11	11.03 ± 0.38	13.38 ± 1.78	532 ± 94
30	24.55 ± 1.85	3.85 ± 0.09	17.85 ± 1.73	6.83 ± 0.78	384 ± 72
50	5.78 ± 0.78	1.78 ± 0.12	35.84 ± 2.64	3.27 ± 0.54	389 ± 63



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PBAT ผสมยาง ENR50: (a) ปริมาณยาง 5 wt% (b) ปริมาณยาง 10 wt% (c) ปริมาณยาง 30 wt% และ (d) ปริมาณยาง 50 wt%

ตารางที่ 4.16 ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ENR25 content (wt%)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_f (J/g)	Degree of crystallinity (%)
0	114.70	17.66	15.49
5	122.20	10.43	9.15
10	121.70	8.37	7.34
30	123.70	5.21	4.57

ตารางที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยางธรรมชาติใน PBAT ผสมยาง ENR50

ENR50 content (wt%)	Average diameter (μm)
5	0.70 ± 0.41
10	0.55 ± 0.17
30	0.99 ± 0.48

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในตารางที่ 4.18 พบว่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR50 มีค่าน้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ ที่มีปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกัน และเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 wt% ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง เนื่องจากความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของ PBAT ซึ่งขึ้นกับปริมาณผลึกของ PBAT เมื่อเติมยางเข้าไปทำให้ปริมาณผลึกลดลง ความแข็งแรงของ PBAT ลดลง ความต้านทานต่อการฉีกขาดจึงลดลงด้วย และอีกสาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากความเข้ากันได้ระหว่าง PBAT กับยาง ENR50 ที่ลดลง ซึ่งจากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่า เมื่อปริมาณยาง ENR50 เพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ลดลง ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงด้วย ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง

สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในตารางที่ 4.19 พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% มีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกับ PBAT บริสุทธิ์ เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมลดลง อาจเป็นผลมาจากปริมาณ PBAT ลดลง ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสม สำหรับการทดสอบการกระแทกตัวของ PBAT บริสุทธิ์และ PBAT ผสมยาง ENR50 มีค่าใกล้เคียงกันทุกสัดส่วน แสดงให้เห็นว่าปริมาณยาง ENR50 ไม่มีอิทธิพลกับการกระแทกตัวของพอลิเมอร์ผสม สำหรับการทดสอบการยืดถาวร พบว่า เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรของ PBAT บริสุทธิ์สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม แสดงว่า

PBAT บริสุทธิ์สามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้น้อยกว่าพอลิเมอร์ผสม และเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรลดลง เนื่องจากยางมีความเป็นอีลาสติกสูง สามารถยืดและหดกลับสู่รูปร่างเดิมได้ ดังนั้นเมื่อปริมาณยางในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น จึงทำให้สามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรจึงมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.18 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ENR50 content (wt%)	Tear strength (N/mm)
0	104 ± 1
5	80 ± 1
10	78 ± 2
30	54 ± 2
50	28 ± 3

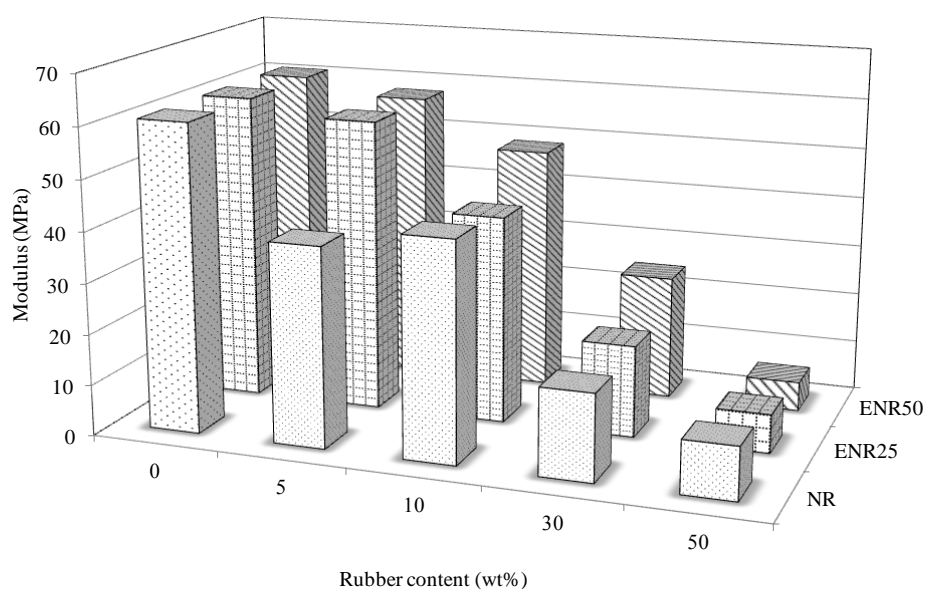
ตารางที่ 4.19 สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ENR50 content (wt%)	Hardness (shore A)	Rebound resilience (%)	Tension set (%)
0	91 ± 1	52 ± 1	47.44 ± 1.56
5	94 ± 1	54 ± 1	42.49 ± 0.95
10	88 ± 1	57 ± 1	42.34 ± 0.53
30	85 ± 1	50 ± 2	39.80 ± 0.37
50	65 ± 2	46 ± 1	33.28 ± 1.52

4.2.1.4 การเปรียบเทียบชนิดยาง

เปรียบเทียบผลของการใช้ยาง 3 ชนิด คือ ยางธรรมชาติ ยาง ENR25 และ ยาง ENR50 เพื่อศึกษาว่ายางชนิดใดมีความเข้ากันได้กับ PBAT มากกว่า โดยค่า E ของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.20 พบว่า PBAT ผสมยาง ENR50 มีค่า E มากกว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยาง ENR25 เนื่องจากยาง ENR มีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งทำให้ยาง ENR มีความแข็งแรง

มากกว่ายางธรรมชาติ และยาง ENR50 มีหมู่อีพ็อกไซด์ 50 mol% มากกว่ายาง ENR25 ที่มีหมู่อีพ็อกไซด์ 25 mol% จึงทำให้ยาง ENR50 มีความแข็งแรงมากกว่ายาง ENR25 ดังนั้นเมื่อนำยาง ENR50 ผสมกับ PBAT ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีความแข็งแรงมากกว่า PBAT ผสมยาง ENR25 และ PBAT ผสมยางธรรมชาติ ยกเว้นที่ปริมาณยาง 50 wt% พบว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติมีค่า E มากกว่า PBAT ผสมยาง ENR25 และ PBAT ผสมยาง ENR50



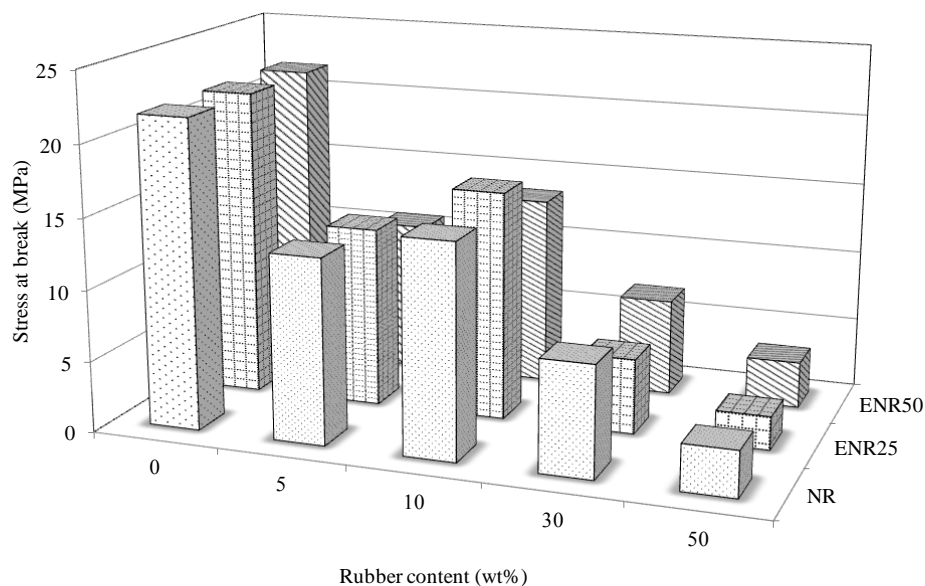
รูปที่ 4.11 มอดุลัสของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ตารางที่ 4.20 มอดุลัสของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

Rubber content (wt%)	Modulus (MPa)		
	NR	ENR25	ENR50
0	60.65 ± 1.71	60.65 ± 1.71	60.65 ± 1.71
5	39.30 ± 1.88	57.68 ± 3.66	57.62 ± 2.54
10	42.96 ± 2.46	40.88 ± 4.55	48.36 ± 1.78
30	17.03 ± 1.62	18.06 ± 1.72	24.55 ± 1.85
50	10.33 ± 0.79	7.61 ± 0.62	5.78 ± 0.78

ค่า σ_b ของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.21 พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% PBAT ผสม

ยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่ค่า σ_b ใกล้เคียงกัน สำหรับที่ปริมาณยาง 30 wt% และ 50 wt% PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยาง ENR50 มีค่าใกล้เคียงกัน

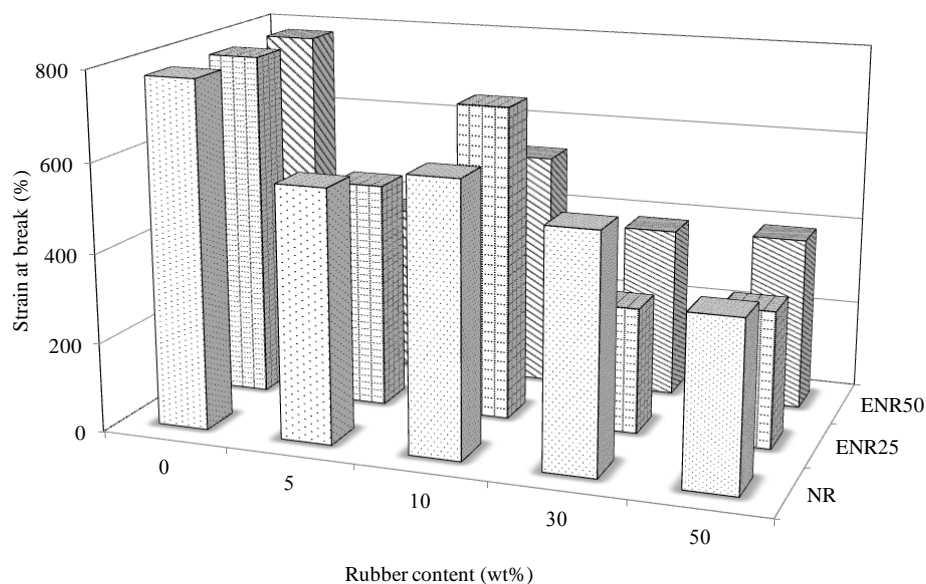


รูปที่ 4.12 ความเค้น ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ตารางที่ 4.21 ความเค้น ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

Rubber content (wt%)	Stress at break (MPa)		
	NR	ENR25	ENR50
0	21.73 ± 0.47	21.73 ± 0.47	21.73 ± 0.47
5	13.02 ± 0.84	12.69 ± 0.41	10.72 ± 0.71
10	14.95 ± 1.17	16.07 ± 1.03	13.38 ± 1.78
30	7.78 ± 0.63	5.29 ± 0.54	6.83 ± 0.78
50	3.21 ± 0.17	2.35 ± 0.35	3.27 ± 0.54

ค่า ϵ_b ของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.22 พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 30 wt% PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่ค่า ϵ_b มากที่สุด ที่ปริมาณยาง 10 wt% PBAT ผสมยาง ENR25 มีค่า ϵ_b มากที่สุดและ 50 wt% PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยาง ENR50 มีค่าใกล้เคียงกัน



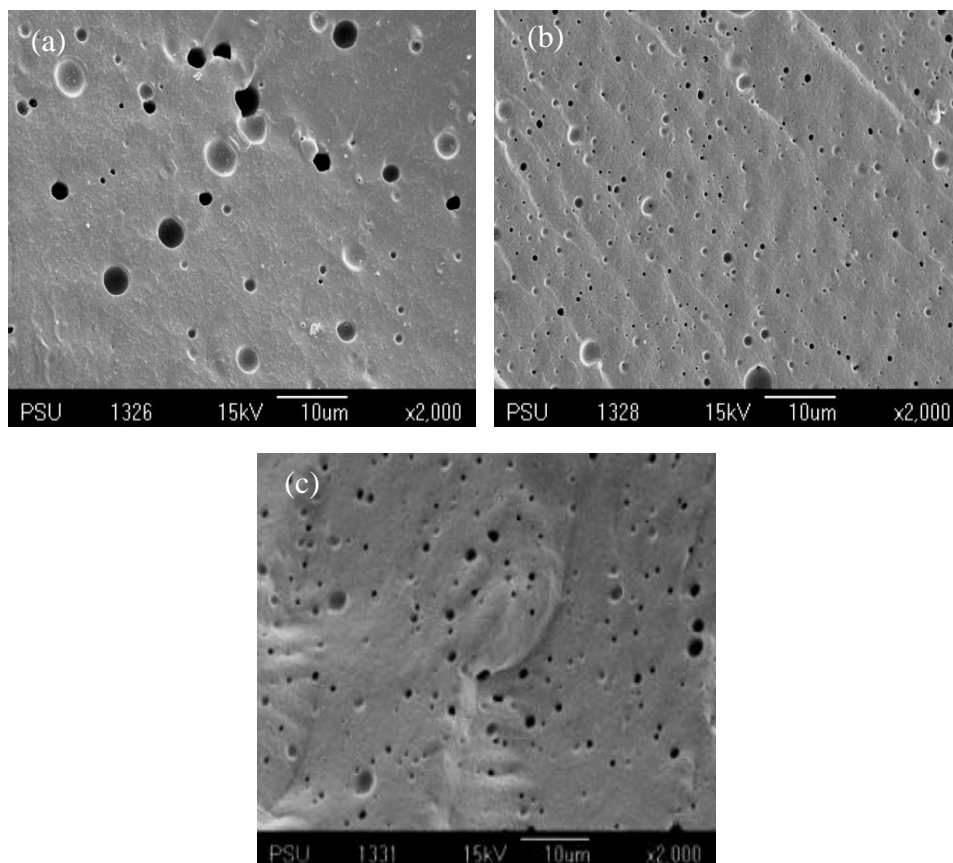
รูปที่ 4.13 ความเครียด ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ตารางที่ 4.22 ความเครียด ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

Rubber content (wt%)	Strain at break (%)		
	NR	ENR25	ENR50
0	778 ± 8	778 ± 8	778 ± 8
5	566 ± 55	507 ± 24	378 ± 60
10	609 ± 66	703 ± 52	531 ± 94
30	527 ± 60	282 ± 45	384 ± 72
50	375 ± 41	306 ± 38	389 ± 63

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.14 – 4.17 โดยมีกำลังขยายต่างกัน จะเห็นช่องว่างที่กระจายอยู่ทั่วไปบนผิวหน้าชิ้นตัวอย่าง นั่นคืออนุภาคของยางที่ถูกสกัดออกด้วยโทลูอีน พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% PBAT ผสมยาง ENR25 มีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยางที่มีขนาดเล็กกว่า PBAT ผสมยาง ENR50 และ PBAT ผสมยางธรรมชาติ โดยแสดงค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยางในตารางที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่า PBAT กับยาง ENR25 มีความเข้ากันได้ดีกว่า PBAT กับยาง ENR50 และ PBAT กับยางธรรมชาติ ยกเว้นที่ปริมาณยาง 30 wt% พบว่า PBAT ผสมยาง ENR50 มี

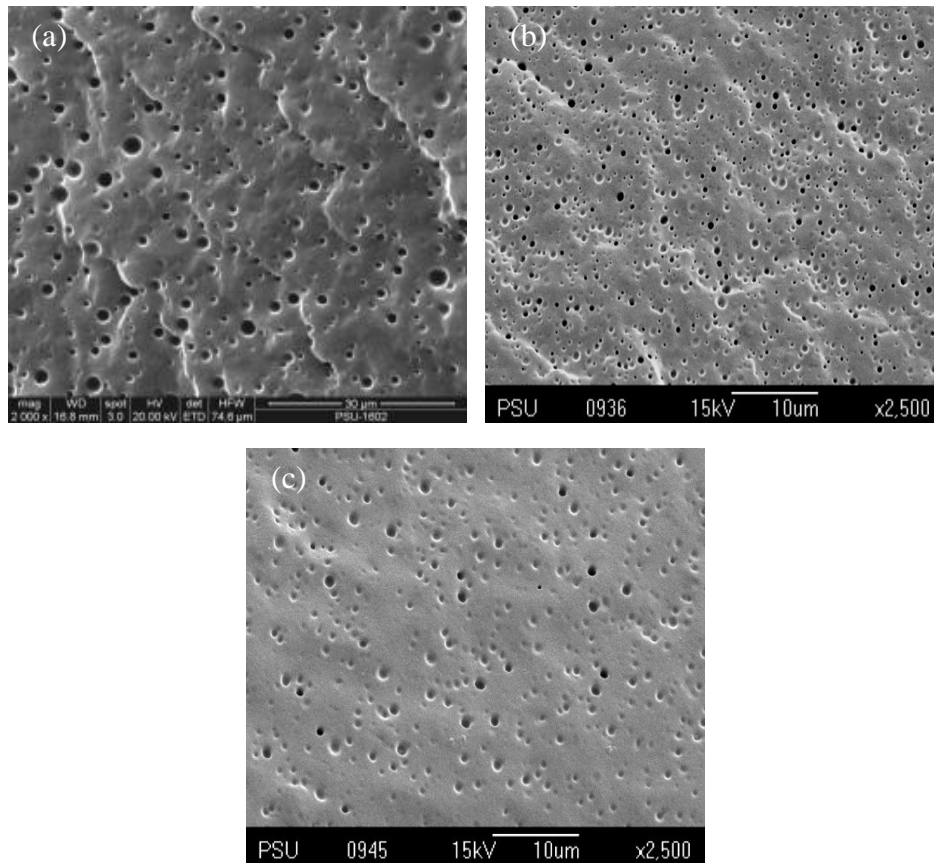
ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยางที่มีขนาดเล็กกว่า PBAT ผสมยาง ENR25 และ PBAT ผสมยางธรรมชาติ และที่ปริมาณยาง 5 wt% พบว่า เฟสของยาง ENR50 มีการกระจายตัวดีกว่าเฟสของยาง ENR25 และยางธรรมชาติ



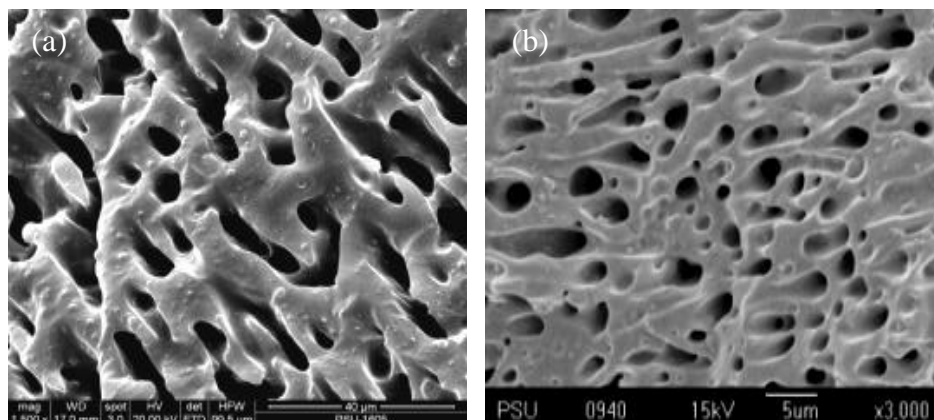
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PBAT ผสมยางแต่ละชนิดที่มีปริมาณยาง 5 wt% ทำการสกัดยางออก: (a) ยางธรรมชาติ (b) ยาง ENR25 และ (c) ยาง ENR50

ตารางที่ 4.23 ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยางแต่ละชนิดที่มีปริมาณยาง 5 wt% 10 wt% และ 30 wt%

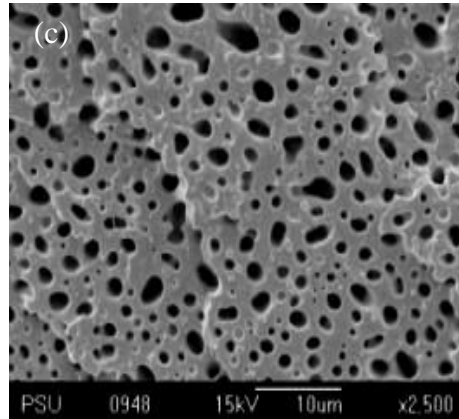
Rubber type	Average diameter (μm)		
	5 wt%	10 wt%	30 wt%
NR	1.44 ± 0.98	0.92 ± 0.46	2.10 ± 0.87
ENR25	0.42 ± 0.27	0.36 ± 0.17	1.50 ± 0.61
ENR50	0.70 ± 0.41	0.55 ± 0.17	0.99 ± 0.48



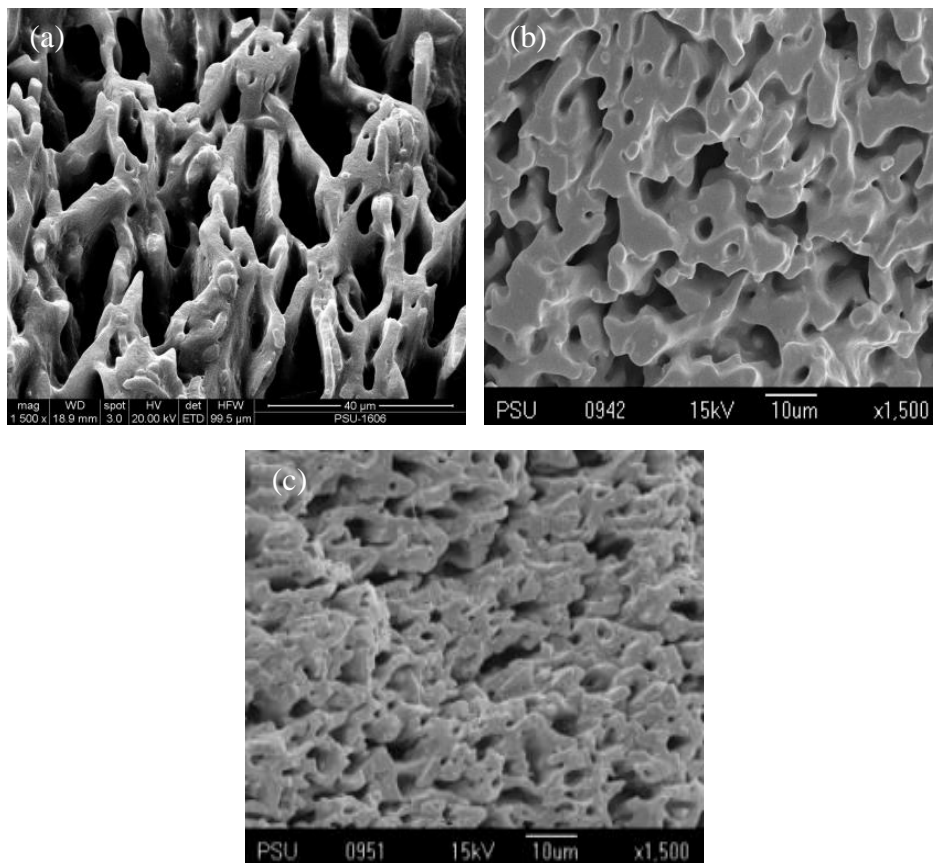
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PBAT ผสมยางแต่ละชนิดที่มีปริมาณยาง 10 wt% ทำการสกัดยางออก: (a) ยางธรรมชาติ (b) ยาง ENR25 และ (c) ยาง ENR50



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PBAT ผสมยางแต่ละชนิดที่มีปริมาณยาง 30 wt% ทำการสกัดยางออก: (a) ยางธรรมชาติ (b) ยาง ENR25 และ (c) ยาง ENR50

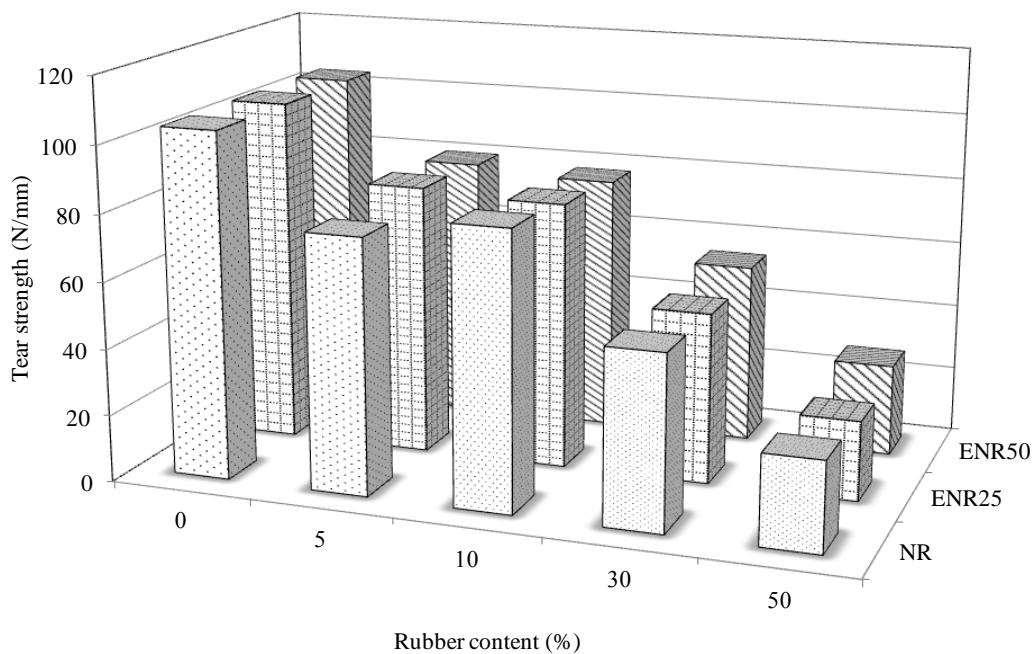


รูปที่ 4.16 (ต่อ)



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PBAT ผสมยางแต่ละชนิดที่มีปริมาณยาง 50 wt% ทำการสกัดยางออก: (a) ยางธรรมชาติ (b) ยาง ENR25 และ (c) ยาง ENR50

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.24 พบว่า ที่แต่ละสัดส่วน PBAT ผสมยางแต่ละชนิดมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าชนิดของยางไม่มีผลต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง

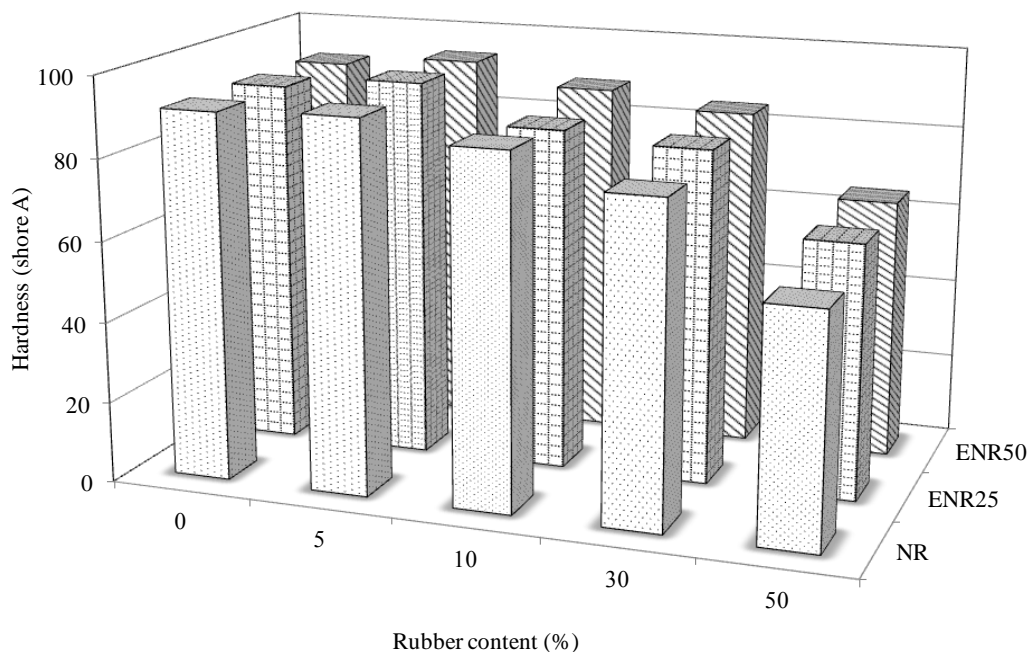


รูปที่ 4.18 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ตารางที่ 4.24 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

Rubber content (wt%)	Tear strength (MPa)		
	NR	ENR25	ENR50
0	104 ± 1	104 ± 1	104 ± 1
5	77 ± 2	81 ± 2	80 ± 1
10	83 ± 2	80 ± 1	78 ± 2
30	52 ± 2	51 ± 1	54 ± 2
50	27 ± 2	24 ± 1	28 ± 3

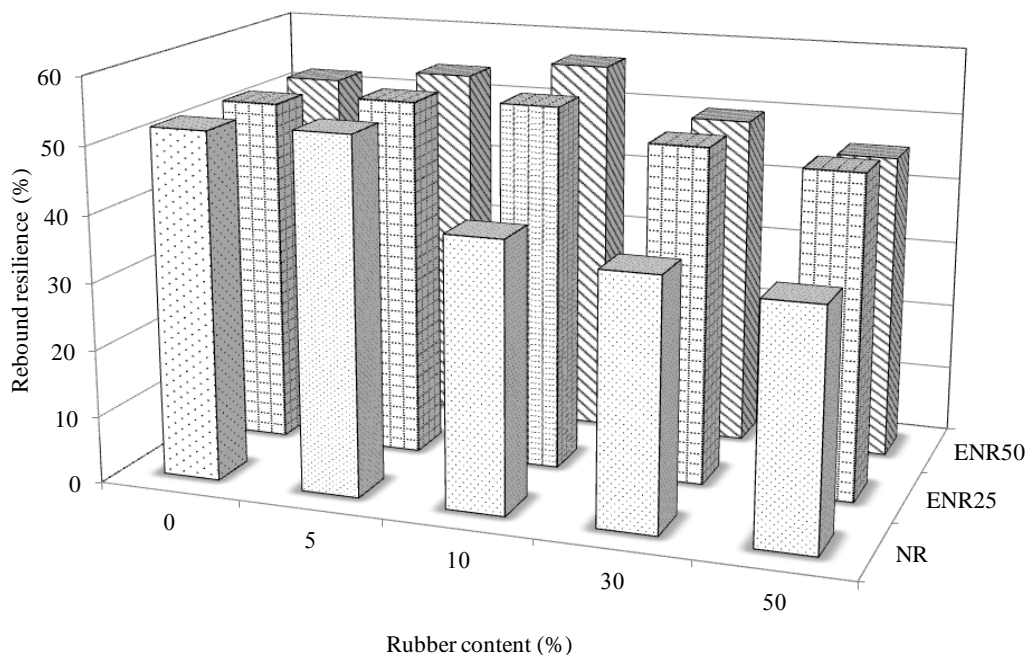
ผลการทดสอบความแข็งของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.25 พบว่า ที่แต่ละสัดส่วน PBAT ผสมยางแต่ละชนิดมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าชนิดของยางไม่มีผลต่อความแข็งของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง



รูปที่ 4.19 ความแข็งของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ตารางที่ 4.25 ความแข็งของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

Rubber content (wt%)	Hardness (shore A)		
	NR	ENR25	ENR50
0	91 ± 1	91 ± 1	91 ± 1
5	92 ± 1	94 ± 1	94 ± 1
10	87 ± 1	85 ± 1	88 ± 1
30	79 ± 1	83 ± 1	85 ± 1
50	57 ± 2	63 ± 2	65 ± 2

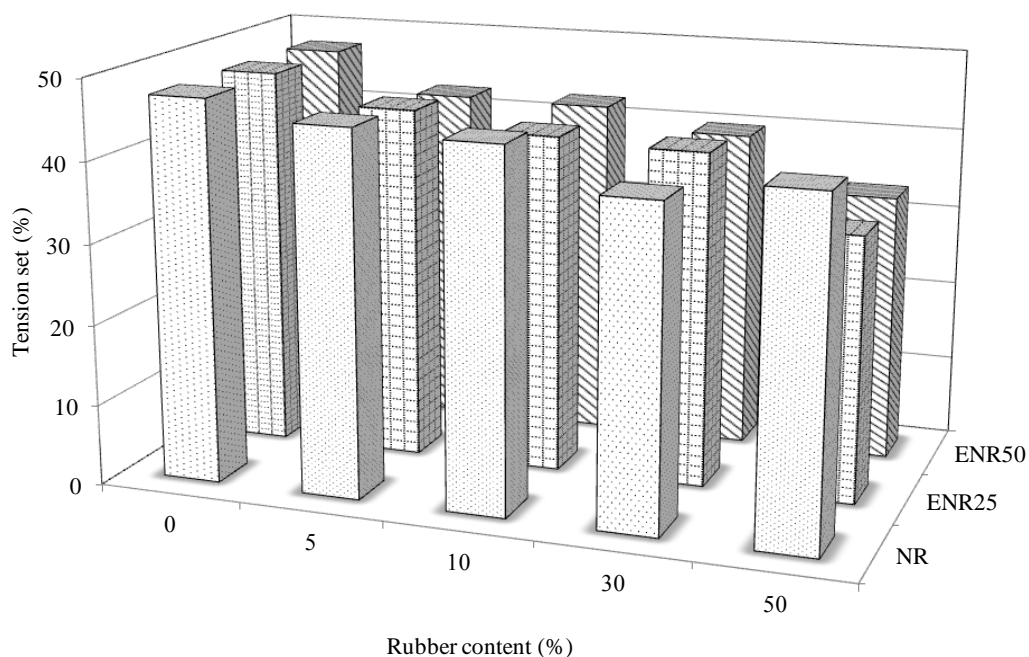


รูปที่ 4.20 การกระด้างตัวของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ตารางที่ 4.26 การกระด้างตัวของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

Rubber content (wt%)	Rebound resilience (%)		
	NR	ENR25	ENR50
0	52 ± 1	52 ± 1	52 ± 1
5	53 ± 1	54 ± 1	54 ± 1
10	40 ± 2	54 ± 1	57 ± 1
30	37 ± 1	50 ± 2	50 ± 2
50	35 ± 3	48 ± 1	46 ± 1

ผลการทดสอบการยืดถาวรของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.27 พบว่า ที่แต่ละสัดส่วน PBAT ผสมยางแต่ละชนิดมีเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าชนิดของยางไม่มีผลต่อการยืดถาวรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ยกเว้นที่ปริมาณยาง 50 wt% พบว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติมีเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรมากที่สุด แสดงว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติคืนสู่รูปร่างเดิมได้น้อยกว่า PBAT ผสมยาง ENR25 และ PBAT ผสมยาง ENR50



รูปที่ 4.21 การยืดถาวรของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ตารางที่ 4.27 การยืดถาวรของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

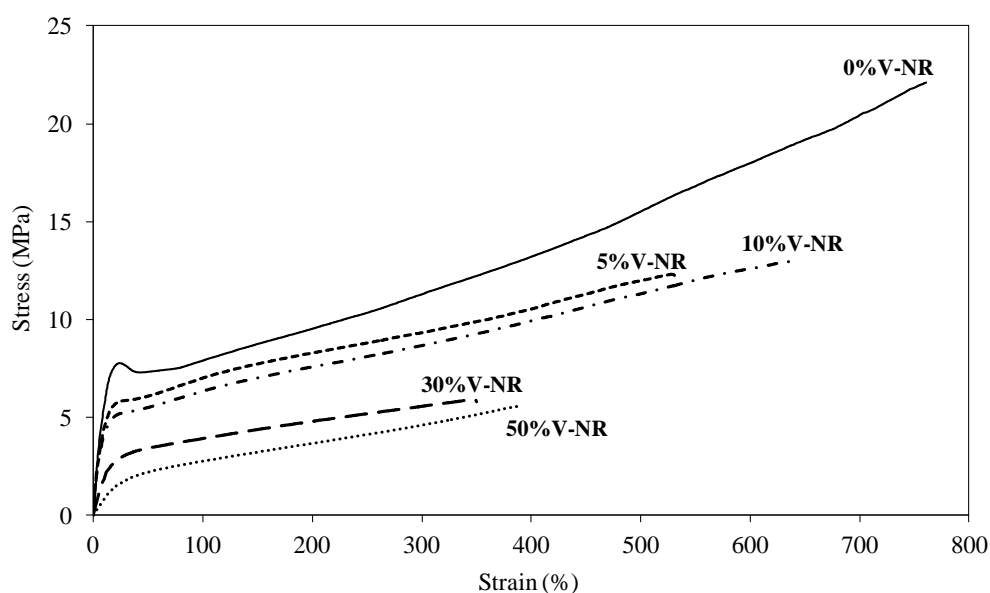
Rubber content (wt%)	Tension set (%)		
	NR	ENR25	ENR50
0	47.44 ± 1.56	47.44 ± 1.56	47.44 ± 1.56
5	45.19 ± 0.73	43.96 ± 0.40	42.49 ± 0.95
10	44.50 ± 1.36	41.92 ± 0.50	42.34 ± 0.53
30	39.49 ± 1.52	41.30 ± 1.70	39.80 ± 0.37
50	41.95 ± 0.94	32.81 ± 1.94	33.28 ± 1.52

ดังนั้นจากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณยาง พบว่า ที่ปริมาณยาง 10 wt% ของยางธรรมชาติ ยาง ENR25 และยาง ENR50 มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของยางพบว่า ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนว่ายางชนิดใดให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณยาง 10 wt% ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ยางแต่ละชนิดมีสมบัติดีที่สุด พบว่า PBAT ผสมยาง ENR25 มีสมบัติความทนต่อแรงดึงมากที่สุด

4.2.2 ยางวัลคาไนซ์

4.2.2.1 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์แสดงในรูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.28 พบว่า ค่า E σ_y ϵ_y σ_b และ ϵ_b ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ และที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% มีค่า E σ_y ϵ_y และ σ_b ใกล้เคียงกัน และเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 wt% ค่า E σ_y ϵ_y และ σ_b ลดลง เนื่องจากโดยธรรมชาติยางมีค่า E ต่ำและเมื่อนำมาผสมกับพลาสติกที่มีค่า E สูงกว่า จึงทำให้ค่า E ลดลง ค่า σ_b ลดลง เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า σ_b ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ขึ้นกับความแข็งแรงของ PBAT ซึ่งขึ้นอยู่กับผลึกของ PBAT เมื่อเติมยางเข้าไปทำให้ปริมาณผลึกลดลง ค่า σ_b จึงลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลึกที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC แสดงในตารางที่ 4.29 พบว่า ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ ที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% มีปริมาณผลึกใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกลดลง เนื่องจากโมเลกุลยางขัดขวางการเกิดนิวคลีไอ (nuclei) ของผลึก PBAT ในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ปริมาณผลึกลดลง ค่า σ_b จึงลดลงด้วย ค่า ϵ_b ที่ปริมาณยาง 10 wt% มากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% และค่า ϵ_b ลดลงเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.22 กราฟความเค้น–ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ตารางที่ 4.28 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

V-NR content (wt%)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
0	60.65 ± 1.71	7.79 ± 0.10	23.42 ± 0.56	21.73 ± 0.47	778 ± 8
5	53.37 ± 1.38	5.69 ± 0.12	9.71 ± 0.55	12.60 ± 0.57	538 ± 33
10	52.11 ± 1.51	5.08 ± 0.09	9.61 ± 0.87	13.29 ± 0.46	632 ± 30
30	14.43 ± 0.80	3.03 ± 0.09	17.82 ± 0.40	5.55 ± 0.32	357 ± 16
50	5.50 ± 0.58	2.05 ± 0.07	30.51 ± 1.52	4.70 ± 0.52	413 ± 52

ตารางที่ 4.29 ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 30 wt%

V-NR content (wt%)	T_m (°C)	ΔH_f (J/g)	Degree of crystallinity (%)
0	114.70	17.66	15.49
5	122.70	11.37	9.97
10	121.37	10.36	9.08
30	121.87	6.17	5.41

การเปรียบเทียบ σ_b และ ϵ_b ของ PBAT ผสมยางธรรมชาติกับ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt% แสดงในตารางที่ 4.30 พบว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติมีค่า σ_b และ ϵ_b ใกล้เคียงกับ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ แสดงให้เห็นว่าการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมคู่นี้

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt% แสดงในตารางที่ 4.31 พบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมอยู่ระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ที่ปริมาณยาง 10 wt% มีความต้านทานต่อการฉีกขาดมากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% และเมื่อเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 wt% ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง

เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานต่อการฉีกขาดระหว่าง PBAT ผสมยางธรรมชาติกับ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 – 30 wt% PBAT

ผสมยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาดมากกว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ แต่ที่ปริมาณยาง 50 wt% พบว่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติ-วัลคาไนซ์มากกว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติ

ตารางที่ 4.30 ความเค้น ณ จุดขาดและความเครียด ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติ และ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

Rubber content (wt%)	σ_b (MPa)		ϵ_b (%)	
	NR	V-NR	NR	V-NR
0	21.73 ± 0.47	21.73 ± 0.47	778 ± 8	778 ± 8
5	13.02 ± 0.84	12.60 ± 0.57	566 ± 55	538 ± 33
10	14.95 ± 1.17	13.29 ± 0.46	609 ± 66	632 ± 30
30	7.78 ± 0.63	5.55 ± 0.32	527 ± 60	357 ± 16
50	3.21 ± 0.17	4.70 ± 0.52	375 ± 41	413 ± 52
100	-	22.23 ± 4.26	-	800 ± 34

ตารางที่ 4.31 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

Rubber content (wt%)	Tear strength (N/mm)	
	NR	V-NR
0	104 ± 1	104 ± 1
5	77 ± 2	46 ± 1
10	83 ± 2	75 ± 1
30	52 ± 2	48 ± 3
50	27 ± 2	39 ± 3
100	-	33 ± 1

สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt% แสดงในตารางที่ 4.32 ผลการทดสอบความแข็งพบว่า PBAT บริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 5 wt% และ 10 wt% มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันอยู่

ในช่วง 90 – 93 shore A และค่าความแข็งลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากปริมาณ PBAT ลดลง ซึ่งส่งผลต่อความแข็งของพอลิเมอร์ผสม เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง PBAT ผสมยางธรรมชาติกับ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ พบว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มีค่าความแข็งมากกว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มีการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางและมีสารตัวเติมอื่นๆ ทำให้ยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มีความแข็งมากกว่ายางธรรมชาติ

ผลการทดสอบการกระด้างตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ พบว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่แต่ละสัดส่วนมีการกระด้างตัวใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง PBAT ผสมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มีการกระด้างตัวที่ใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น พบว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มีการกระด้างตัวมากกว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติ

ตารางที่ 4.32 สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

Rubber content (wt%)	Hardness (shore A)		Rebound resilience (%)		Tension set (%)	
	NR	V-NR	NR	V-NR	NR	V-NR
0	91 ± 1	91 ± 1	52 ± 1	52 ± 1	47.44 ± 1.56	47.44 ± 1.56
5	92 ± 1	93 ± 1	53 ± 1	53 ± 2	45.19 ± 0.73	45.57 ± 0.62
10	87 ± 1	90 ± 1	40 ± 2	50 ± 1	44.50 ± 1.36	45.38 ± 1.82
30	79 ± 1	85 ± 1	37 ± 1	52 ± 1	39.49 ± 1.52	27.18 ± 0.95
50	57 ± 1	71 ± 1	35 ± 3	54 ± 2	41.95 ± 0.94	12.05 ± 1.56
100	-	43 ± 1	-	62 ± 3	-	0.62 ± 0.07

ผลการทดสอบการยืดถาวรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt% พบว่า เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรของพอลิเมอร์ผสมอยู่ระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ที่ปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 5 wt% และ 10 wt% มีเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรใกล้เคียงกัน และเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณยางที่เพิ่มขึ้นทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นอีลาสติกเพิ่มขึ้นสามารถคืนรูปร่างเดิมได้มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรจึงมีค่า

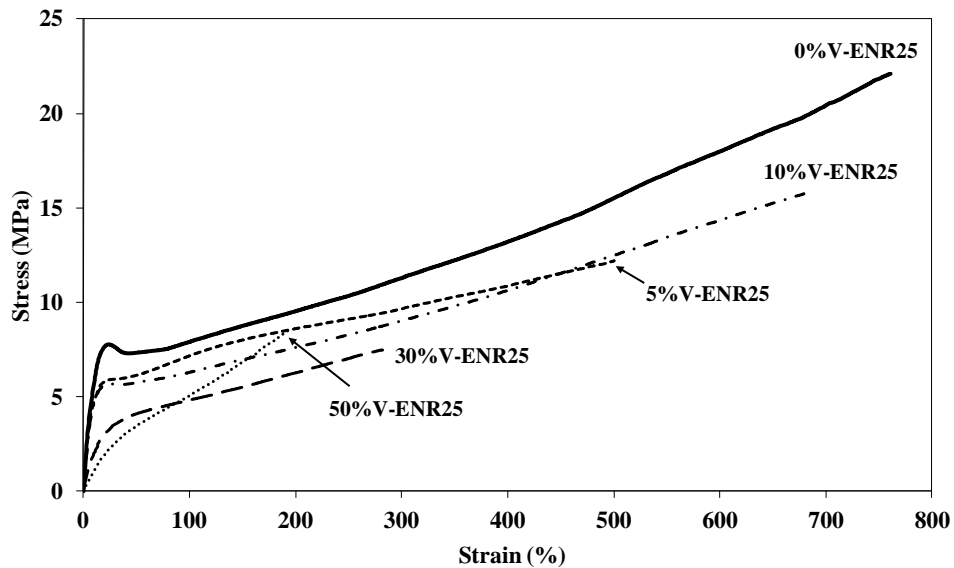
ต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง PBAT ผสมยางธรรมชาติกับ PBAT ผสมยางธรรมชาติ-วัลคาไนซ์ พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มีเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรที่ใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น พบว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มีเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรน้อยกว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติ เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติที่มีการเชื่อมโยงจะมีเสถียรภาพมากกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีการเชื่อมโยง ทำให้ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์สามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้มากกว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ มีค่าการยืดถาวรลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มากขึ้น เนื่องจากมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากขึ้น จึงสามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้มากขึ้น

4.2.2.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 วัลคาไนซ์

สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.33 พบว่า ค่า E , σ_y , ϵ_y , σ_b และ ϵ_b ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 วัลคาไนซ์น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ และที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% มีค่า E และ ϵ_y ใกล้เคียงกัน และเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 wt% ค่า E และ ϵ_y ลดลง เนื่องจากโดยธรรมชาติยางมีค่า E ต่ำและเมื่อนำมาผสมกับพลาสติกที่มีค่า E สูงกว่า จึงทำให้ค่า E ลดลง ค่า σ_b และ ϵ_b ที่ปริมาณยาง 10 wt% มากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% และค่า σ_b และ ϵ_b ลดลงเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า σ_b ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 วัลคาไนซ์ขึ้นกับความแข็งแรงของ PBAT ซึ่งขึ้นอยู่กับผลึกของ PBAT เมื่อเติมยางเข้าไปทำให้ปริมาณผลึกลดลง ค่า σ_b จึงลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลึกที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC แสดงในตารางที่ 4.34 พบว่าปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ ที่ปริมาณยาง 10 wt% มีปริมาณผลึกมากกว่าที่ปริมาณ 5 wt% ทำให้ที่ปริมาณยาง 10 wt% มีค่า σ_b มากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% และเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกลดลง เนื่องจากโมเลกุลยางขัดขวาง การเกิดนิวคลีไอ (nuclei) ของผลึก PBAT ในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ปริมาณผลึกลดลง ค่า σ_b จึงลดลงด้วย

เมื่อเปรียบเทียบ σ_b และ ϵ_b ของ PBAT ผสมยาง ENR25 กับ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ แสดงในตารางที่ 4.35 พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 – 30 wt% PBAT ผสมยาง ENR25 และ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์มีค่า σ_b และ ϵ_b ใกล้เคียงกัน ที่ปริมาณยาง 50 wt% พบว่า PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์มีค่า σ_b มากกว่า PBAT ผสมยาง ENR25 เนื่องจากการวัลคาไนซ์เป็นการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้ยางมีความ

แข็งแรงมากขึ้น ค่า σ_b ของยางวัลคาไนซ์จึงมากกว่ายางไม่วัลคาไนซ์ แต่ PBAT ผสมยาง ENR25 มีค่า ϵ_b มากกว่า PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ เนื่องจากยางที่วัลคาไนซ์มีข้อจำกัดในการไหลและการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุล ทำให้ค่า ϵ_b ของยางวัลคาไนซ์น้อยกว่ายางไม่วัลคาไนซ์



รูปที่ 4.23 กราฟความเค้น–ความเครียดของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ตารางที่ 4.33 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

V-ENR25 content (wt%)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
0	60.65 ± 1.71	7.79 ± 0.10	23.42 ± 0.56	21.73 ± 0.47	778 ± 8
5	55.57 ± 3.79	5.75 ± 0.08	9.54 ± 1.18	12.06 ± 0.79	499 ± 54
10	54.46 ± 1.79	5.25 ± 0.12	9.35 ± 0.43	15.44 ± 0.63	682 ± 35
30	18.07 ± 1.70	3.63 ± 0.09	19.23 ± 1.67	6.97 ± 0.93	282 ± 48
50	7.56 ± 1.32	2.70 ± 0.46	31.79 ± 2.35	7.12 ± 1.43	200 ± 65

ตารางที่ 4.34 ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

V- ENR25 content (wt%)	T_m (°C)	ΔH_f (J/g)	Degree of crystallinity (%)
0	114.70	17.66	15.49
5	123.37	10.26	9.00
10	117.87	11.48	10.07
30	122.37	7.77	6.81

ตารางที่ 4.35 ความเค้น ณ จุดขาดและความเครียด ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยาง ENR25 และ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์

Rubber content (wt%)	σ_b (MPa)		ϵ_b (%)	
	ENR25	V-ENR25	ENR25	V-ENR25
0	21.73 ± 0.47	21.73 ± 0.47	778 ± 8	778 ± 8
5	12.69 ± 0.41	12.06 ± 0.79	507 ± 24	499 ± 54
10	16.07 ± 1.03	15.44 ± 0.63	703 ± 52	682 ± 35
30	5.29 ± 0.54	6.97 ± 0.93	282 ± 45	282 ± 48
50	2.35 ± 0.25	7.12 ± 1.43	306 ± 38	200 ± 65
100	-	11.07 ± 2.46	-	593 ± 49

ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt% แสดงในตารางที่ 4.36 พบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมอยู่ระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 วัลคาไนซ์ ที่ปริมาณยาง 10 wt% มีความต้านทานต่อการฉีกขาดมากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% และเมื่อยางเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 wt% ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง เนื่องจากความความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับความแข็งของ PBAT ซึ่งขึ้นกับปริมาณผลึกของ PBAT เมื่อเติมยางเข้าไปทำให้ปริมาณผลึกลดลง ความแข็งของ PBAT ลดลง ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงด้วย

เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานต่อการฉีกขาดระหว่าง PBAT ผสมยาง ENR25 กับ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% PBAT ผสมยาง ENR25 มีความต้านทานต่อการฉีกขาดมากกว่า PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นเป็น 10 wt% ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR25

และ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นเป็น 30 wt% และ 50 wt% พบว่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR25 มีความต้านทานต่อการฉีกขาดน้อยกว่า PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์

ตารางที่ 4.36 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR25 และ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่ปริมาณยาง 0 – 100 wt%

Rubber content (wt%)	Tear strength (N/mm)	
	ENR25	V-ENR25
0	104 ± 1	104 ± 1
5	81 ± 2	60 ± 2
10	80 ± 1	80 ± 2
30	51 ± 1	59 ± 3
50	24 ± 1	38 ± 3
100	-	37 ± 2

สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt% แสดงในตารางที่ 4.37 พบว่า PBAT บริสุทธิ์ และพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยาง ENR25 วัลคาไนซ์ 5 wt% และ 10 wt% มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 90 – 93 shore A และค่าความแข็งลดลงเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่าง PBAT ผสมยาง ENR25 กับ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ พบว่าที่แต่ละสัดส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน

ผลการทดสอบการกระด้างตัวของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์พบว่า PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่ทุกสัดส่วนมีค่าการกระด้างตัวใกล้เคียงกัน ซึ่งมีการกระด้างตัวอยู่ในช่วง 51 – 54% เมื่อเปรียบเทียบกับ PBAT ผสมยาง ENR25 กับ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ พบว่า ที่แต่ละสัดส่วนมีค่าการกระด้างตัวใกล้เคียงกัน

ผลการทดสอบการยืดถาวรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 วัลคาไนซ์ พบว่า เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรของพอลิเมอร์ผสมอยู่ระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 วัลคาไนซ์ ที่ปริมาณยาง ENR25 วัลคาไนซ์ 5 wt% และ 10 wt% มีเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรใกล้เคียงกัน และเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรลดลงเมื่อปริมาณยาง ENR25 วัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณยางที่เพิ่มขึ้นทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นอีลาสติคเพิ่มขึ้นสามารถคืนสู่

รูปร่างเดิมได้มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรจึงมีค่าต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง PBAT ผสมยาง ENR25 กับ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% PBAT ผสมยาง ENR25 และ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์มีเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรที่ใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น พบว่า PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์มีเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรมากกว่า PBAT ผสมยาง ENR25 เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยาง ENR25 ที่มีการเชื่อมโยงจะมีเสถียรภาพมากกว่ายาง ENR25 ที่ไม่มีการเชื่อมโยง ทำให้ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์สามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้มากกว่า PBAT ผสมยาง ENR25 และ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์มีค่าการยืดถาวรลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณยาง ENR25 วัลคาไนซ์มากขึ้น เนื่องจากมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากขึ้น จึงสามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้มากขึ้น

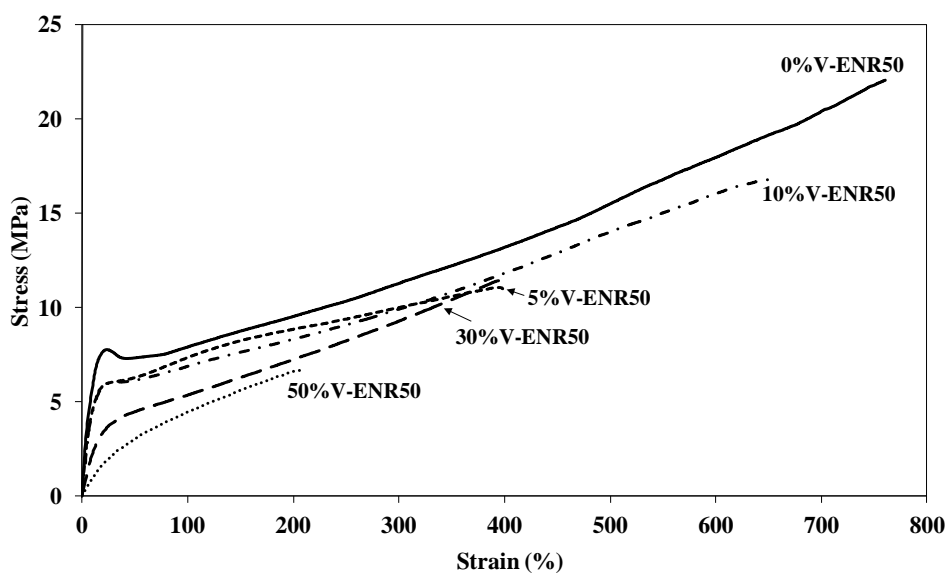
ตารางที่ 4.37 สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยาง ENR25 และ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

Rubber content (wt%)	Hardness (shore A)		Rebound resilience (%)		Tension set (%)	
	ENR25	V-ENR25	ENR25	V-ENR25	ENR25	V-ENR25
0	91 ± 1	91 ± 1	52 ± 1	52 ± 1	47.44 ± 1.56	47.44 ± 1.56
5	94 ± 1	93 ± 1	54 ± 1	52 ± 3	43.96 ± 0.40	43.08 ± 0.86
10	85 ± 1	90 ± 1	54 ± 1	51 ± 1	41.92 ± 0.50	41.05 ± 1.60
30	83 ± 1	84 ± 3	50 ± 2	53 ± 2	41.30 ± 1.70	23.53 ± 1.04
50	63 ± 2	68 ± 5	48 ± 1	53 ± 1	32.81 ± 1.94	11.78 ± 1.37
100	-	46 ± 1	-	54 ± 2	-	0.75 ± 0.17

4.2.2.3 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR50 วัลคาไนซ์

สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.24 และตารางที่ 4.38 พบว่า ค่า E , σ_y , ϵ_y , σ_b และ ϵ_b ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ และค่า E ลดลง เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากโดยธรรมชาติยางมีค่า E ต่ำและเมื่อนำมาผสมกับพลาสติกที่มีค่า E สูงกว่า จึงทำให้ค่า E ลดลง แต่ σ_b และ ϵ_b ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยาง 10 wt% มากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 wt% ค่า σ_b และ

ϵ_b ลดลง เนื่องจากค่า σ_b ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR50 วัลคาไนซ์ขึ้นกับความแข็งแรงของ PBAT ซึ่งขึ้นอยู่กับผลึกของ PBAT เมื่อเติมยางเข้าไปทำให้ปริมาณผลึกลดลง ค่า σ_b จึงลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลึกที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC แสดงในตารางที่ 4.39 พบว่า ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ และเมื่อปริมาณยางวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกลดลง เนื่องจากโมเลกุลยางขัดขวางการเกิดนิวคลีไอ (nuclei) ของผลึก PBAT ในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ปริมาณผลึกลดลง ค่า σ_b จึงลดลงด้วย



รูปที่ 4.24 กราฟความเค้น–ความเครียดของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง ENR50 วัลคาไนซ์ 0 – 50 wt%

เมื่อเปรียบเทียบค่า σ_b ระหว่าง PBAT ผสมยาง ENR50 กับ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์แสดงในตารางที่ 4.40 พบว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% มีค่า σ_b ใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นพบว่า PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์มีค่า σ_b มากกว่า PBAT ผสมยาง ENR50 เนื่องจากการวัลคาไนซ์เป็นการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น ค่า σ_b ของยางวัลคาไนซ์จึงมากกว่ายางไม่วัลคาไนซ์ ที่ปริมาณยาง 50 wt% พบว่า PBAT ผสมยาง ENR50 มีค่า ϵ_b มากกว่า PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ เนื่องจากยางที่วัลคาไนซ์มีข้อจำกัดในการไหลและการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุล ทำให้ค่า ϵ_b ของยางวัลคาไนซ์น้อยกว่ายางไม่วัลคาไนซ์

ตารางที่ 4.38 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง ENR50 วัลคาไนซ์ 0 – 50 wt%

V-ENR50 content (wt%)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
0	60.65 ± 1.71	7.79 ± 0.10	23.42 ± 0.56	21.73 ± 0.47	778 ± 8
5	52.88 ± 1.72	5.69 ± 0.11	9.99 ± 0.64	10.85 ± 0.45	400 ± 23
10	49.38 ± 2.44	5.52 ± 0.12	10.78 ± 0.65	16.37 ± 0.70	647 ± 31
30	24.09 ± 1.21	3.82 ± 0.10	15.80 ± 0.85	11.66 ± 0.54	383 ± 42
50	8.06 ± 1.06	2.29 ± 0.29	27.52 ± 2.42	6.26 ± 0.45	211 ± 12

ตารางที่ 4.39 ปริมาณผลึกของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

V- ENR50 content (wt%)	T_m (°C)	ΔH_f (J/g)	Degree of crystallinity (%)
0	114.70	17.66	15.49
5	123.03	10.61	9.31
10	120.70	10.04	8.81
30	122.37	6.81	5.98

ตารางที่ 4.40 ความเค้น ณ จุดขาดและความเครียด ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยาง ENR50 และ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

Rubber content (wt%)	σ_b (MPa)		ϵ_b (%)	
	ENR50	V-ENR50	ENR50	V-ENR50
0	21.73 ± 0.47	21.73 ± 0.47	778 ± 8	778 ± 8
5	10.72 ± 0.71	10.85 ± 0.45	378 ± 60	400 ± 23
10	13.38 ± 1.78	16.37 ± 0.70	532 ± 94	647 ± 31
30	6.83 ± 0.78	11.66 ± 0.54	384 ± 72	383 ± 42
50	3.27 ± 0.54	6.26 ± 0.45	389 ± 63	211 ± 12
100	-	19.44 ± 4.31	-	652 ± 44

ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt% แสดงในตารางที่ 4.41 พบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมอยู่ระหว่าง PBAT กับยาง ENR50 วัลคาไนซ์ PBAT กับยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 10 wt% มีความต้านทานต่อการฉีกขาดมากกว่าที่ปริมาณยาง 5 wt% และเมื่อเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 wt% ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง สอดคล้องกับสมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง PBAT ผสมยาง ENR50 กับ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% PBAT ผสมยาง ENR50 มีความต้านทานต่อการฉีกขาดมากกว่า PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น PBAT ผสมยาง ENR25 มีความต้านทานต่อการฉีกขาดน้อยกว่า PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์

ตารางที่ 4.41 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR50 และ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

Rubber content (wt%)	Tear strength (N/mm)	
	ENR50	V-ENR50
0	104 ± 1	104 ± 1
5	80 ± 1	60 ± 2
10	78 ± 2	88 ± 2
30	54 ± 2	67 ± 3
50	28 ± 3	51 ± 5
100	-	30 ± 2

สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt% แสดงในตารางที่ 4.42 พบว่า PBAT บริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยาง ENR25 วัลคาไนซ์ 5 wt% และ 10 wt% มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 89 – 94 shore A และค่าความแข็งลดลงเมื่อปริมาณยาง ENR25 วัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง PBAT ผสมยาง ENR50 กับ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์พบว่าแต่ละสัดส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน

ผลการทดสอบการกระด้างตัวของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ พบว่า PBAT บริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยาง ENR25 วัลคาไนซ์ 5 wt% และ 10 wt% มีค่า

การกระด้างตัวใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 52 – 53% และเมื่อปริมาณยาง ENR50 วัลคาไนซ์ เพิ่มขึ้น ค่าการกระด้างตัวของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่าง PBAT ผสมยาง ENR50 กับ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% มีค่าการกระด้างตัวที่ใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นพบว่า PBAT ผสมยาง ENR50 มีค่าการกระด้างตัวมากกว่า PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์

ตารางที่ 4.42 สมบัติทางกายภาพของ PBAT ผสมยาง ENR50 และ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

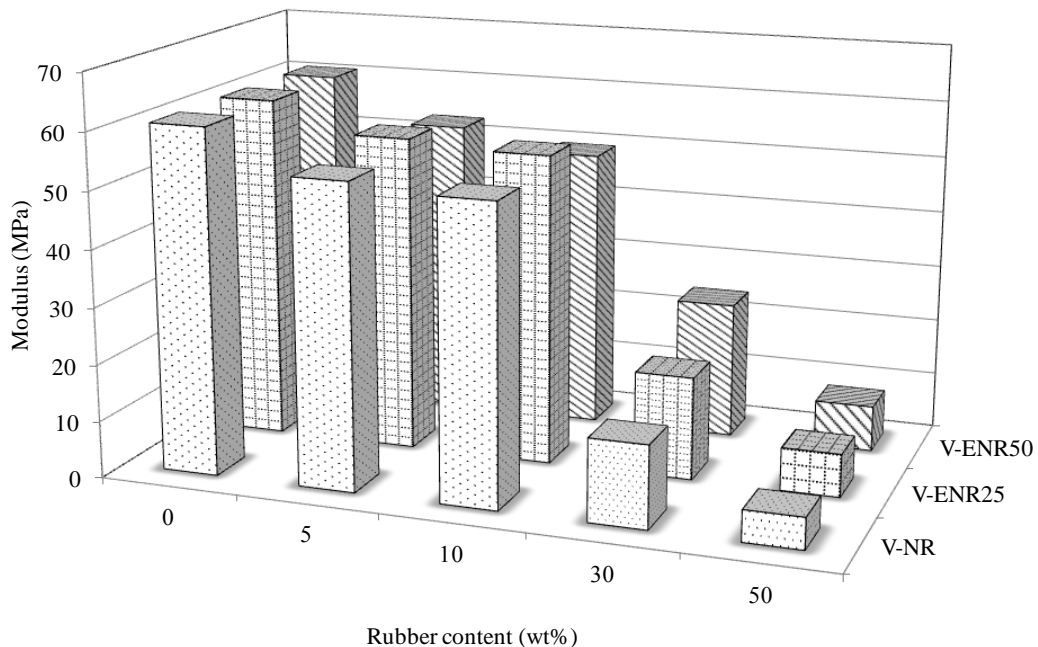
Rubber content (wt%)	Hardness (shore A)		Rebound resilience (%)		Tension set (%)	
	ENR50	V-ENR50	ENR50	V-ENR50	ENR50	V-ENR50
0	91 ± 1	91 ± 1	52 ± 1	52 ± 1	47.44 ± 1.56	47.44 ± 1.56
5	94 ± 1	94 ± 2	54 ± 1	53 ± 1	42.49 ± 0.95	45.10 ± 0.92
10	88 ± 1	89 ± 1	57 ± 1	52 ± 1	42.34 ± 0.53	41.93 ± 0.84
30	85 ± 1	81 ± 1	50 ± 2	33 ± 2	39.80 ± 0.37	21.21 ± 0.78
50	65 ± 2	66 ± 1	46 ± 1	20 ± 2	33.28 ± 1.52	6.71 ± 0.66
100	-	47 ± 1	-	17 ± 1	-	0.86 ± 0.08

ผลการทดสอบการยืดถาวรของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR50 วัลคาไนซ์ พบว่า เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรของพอลิเมอร์ผสมอยู่ระหว่าง PBAT กับยาง ENR50 วัลคาไนซ์ เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรลดลง เมื่อปริมาณยาง ENR50 วัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณยางที่เพิ่มขึ้นทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นอีลาสติกเพิ่มขึ้นสามารถคืนรูปร่างเดิมได้มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรจึงมีค่าต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่าง PBAT ผสมยาง ENR50 กับ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% PBAT ผสมยาง ENR50 และ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์มีเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรที่ใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น พบว่า PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์มีเปอร์เซ็นต์การยืดถาวرن้อยกว่า PBAT ผสมยาง ENR50 เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางที่มีการเชื่อมโยงจะมีเสถียรภาพมากกว่ายางที่ไม่มีการเชื่อมโยง ทำให้ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์สามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้มากกว่า PBAT ผสมยาง ENR50 และ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์มีค่าการยืดถาวรลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณยาง ENR50

วัลคาไนซ์มากขึ้น เนื่องจากมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากขึ้น จึงสามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้มากขึ้น

4.2.2.4 การเปรียบเทียบชนิดยางวัลคาไนซ์

เปรียบเทียบสมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ทั้ง 3 ชนิดคือ ยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ยาง ENR25 วัลคาไนซ์และยาง ENR50 วัลคาไนซ์ พบว่าค่า E ของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.25 และตารางที่ 4.43 พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์มีค่า E มากกว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยาง ENR50 และที่ปริมาณยาง 30 wt% และ 50 wt% PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์มีค่า E มากกว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์และ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์



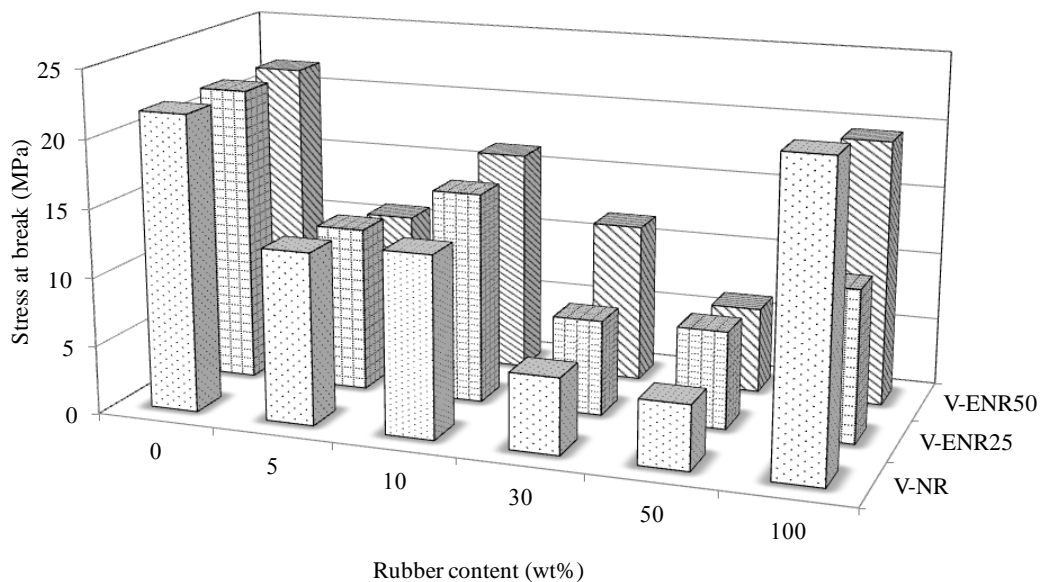
รูปที่ 4.25 มอดุลัสของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

ค่า σ_b ของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.44 พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์และ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์มีค่า σ_b ใกล้เคียงกัน ที่ปริมาณยาง 10 wt%

และ 30 wt% PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์มีค่า σ_b มากที่สุด ที่ปริมาณยาง 50 wt% PBAT ผสมยาง ENR25 มีค่า σ_b มากที่สุด แสดงให้เห็นว่า PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนว่ายางวัลคาไนซ์ชนิดใดมีค่า σ_b ดีที่สุด เนื่องจากในแต่ละอัตราส่วนมีผลที่ไม่สอดคล้องกัน

ตารางที่ 4.43 มอดุลัสของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 50 wt%

Rubber content (wt%)	Modulus (MPa)		
	NR	ENR25	ENR50
0	60.65 ± 1.71	60.65 ± 1.71	60.65 ± 1.71
5	53.37 ± 1.38	55.57 ± 3.79	52.88 ± 1.72
10	52.11 ± 1.51	54.46 ± 1.79	49.38 ± 2.44
30	14.43 ± 0.80	18.07 ± 1.70	24.09 ± 1.21
50	5.50 ± 0.58	7.56 ± 1.32	8.06 ± 1.06

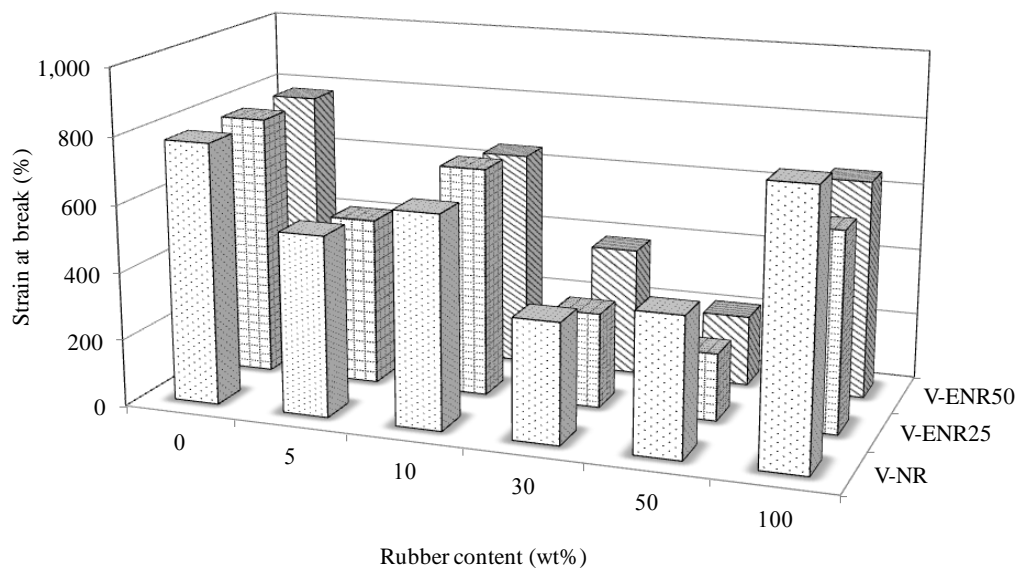


รูปที่ 4.26 ความเค้น ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt

ตารางที่ 4.44 ความเค้น ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

Rubber content (wt%)	Stress at break (MPa)		
	NR	ENR25	ENR50
0	21.73 ± 0.47	21.73 ± 0.47	21.73 ± 0.47
5	12.60 ± 0.57	12.06 ± 0.79	10.85 ± 0.45
10	13.29 ± 0.46	15.44 ± 0.63	16.37 ± 0.70
30	5.55 ± 0.32	6.97 ± 0.93	11.66 ± 0.54
50	4.70 ± 0.52	7.12 ± 1.43	6.26 ± 0.45
100	22.23 ± 4.26	11.07 ± 2.46	19.44 ± 4.31

ค่า ϵ_b ของ PBAT ผสมยางชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณยาง 0 – 50 wt% แสดงในรูปที่ 4.27 และตารางที่ 4.45 พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% PBAT ผสมยางธรรมชาติ วัลคาไนซ์และ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์มีค่า ϵ_b ใกล้เคียงกัน ที่ปริมาณยาง 10 wt% ยางวัลคาไนซ์ทั้งสามชนิดมีค่า ϵ_b ใกล้เคียงกัน ที่ปริมาณยาง 30 wt% PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์มีค่า ϵ_b ใกล้เคียงกัน และที่ปริมาณยาง 50 wt% พบว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มีค่า ϵ_b มากที่สุด แสดงให้เห็นว่า PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนว่ายางวัลคาไนซ์ชนิดใดมีค่า ϵ_b ดีที่สุด เนื่องจากในแต่ละอัตราส่วนมีผลที่ไม่สอดคล้องกัน

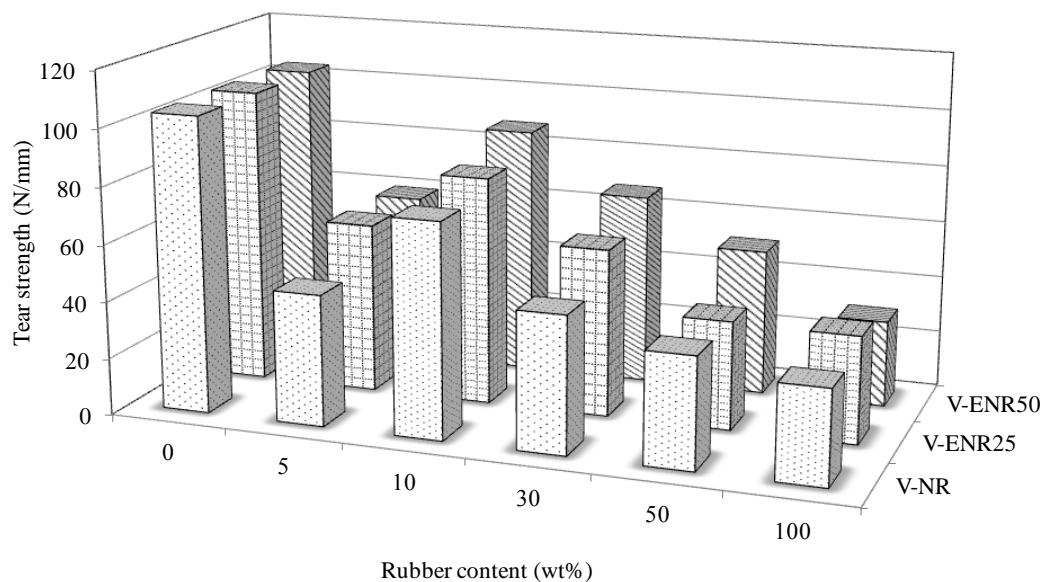


รูปที่ 4.27 ความเครียด ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

ตารางที่ 4.45 ความเครียด ณ จุดขาดของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

Rubber content (wt%)	Strain at break (%)		
	NR	ENR25	ENR50
0	778 ± 8	778 ± 8	778 ± 8
5	538 ± 33	499 ± 54	400 ± 23
10	632 ± 30	682 ± 35	647 ± 31
30	357 ± 16	282 ± 48	383 ± 42
50	413 ± 52	200 ± 65	211 ± 12
100	800 ± 34	593 ± 49	652 ± 44

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณยาง 0 – 100 wt% แสดงในรูปที่ 4.28 และตารางที่ 4.46 พบว่า ปริมาณยาง 0 – 50 wt% PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์มีความต้านทานต่อการฉีกขาดมากกว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยาง ENR25 แสดงให้เห็นว่า PBAT ผสมยาง ENR50 มีความต้านทานต่อการฉีกขาดมากที่สุด

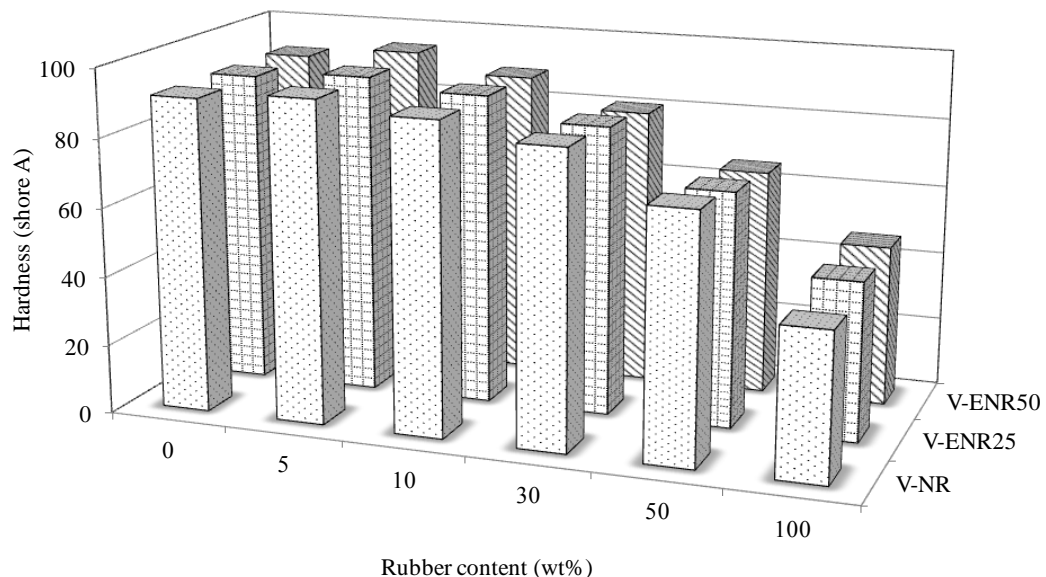


รูปที่ 4.28 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

ตารางที่ 4.46 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

Rubber content (wt%)	Tear strength (MPa)		
	NR	ENR25	ENR50
0	104 ± 1	104 ± 1	104 ± 1
5	46 ± 1	60 ± 2	60 ± 2
10	75 ± 1	80 ± 2	88 ± 2
30	48 ± 3	59 ± 3	67 ± 3
50	39 ± 3	38 ± 3	51 ± 5
100	33 ± 1	37 ± 2	30 ± 2

ผลการทดสอบความแข็งของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณยาง 0 – 100 wt% แสดงในรูปที่ 4.29 และตารางที่ 4.47 พบว่า ที่แต่ละสัดส่วน PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์แต่ละชนิดมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าชนิดของยางวัลคาไนซ์ไม่มีผลต่อความแข็งของพอลิเมอร์ผสม

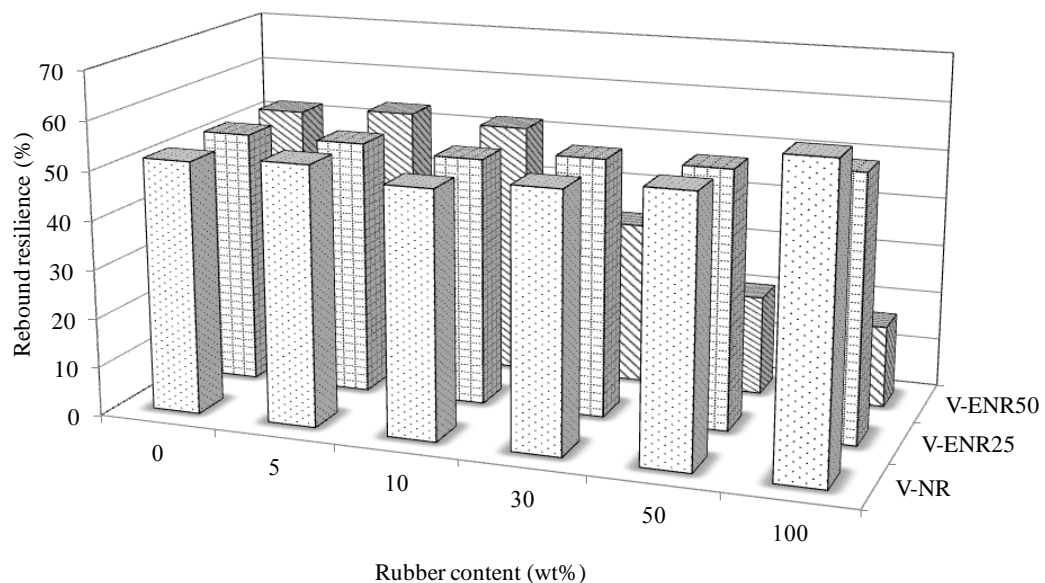


รูปที่ 4.29 ความแข็งของ PBAT ผสมยางยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

ตารางที่ 4.47 ความแข็งของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

Rubber content (wt%)	Hardness (shore A)		
	NR	ENR25	ENR50
0	91 ± 1	91 ± 1	91 ± 1
5	93 ± 1	93 ± 1	94 ± 2
10	90 ± 1	90 ± 1	89 ± 1
30	85 ± 1	84 ± 3	81 ± 1
50	71 ± 1	68 ± 5	66 ± 1
100	43 ± 1	46 ± 1	47 ± 1

ผลการทดสอบการกระเดื่องตัวของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณยาง 0 – 100 wt% แสดงในรูปที่ 4.30 และตารางที่ 4.48 พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% PBAT ผสมยางแต่ละชนิดมีค่าการกระเดื่องตัวใกล้เคียงกัน แต่ที่ปริมาณยาง 30 wt% 50 wt% และ 100 wt% PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์มีค่าการกระเดื่องตัวน้อยที่สุด

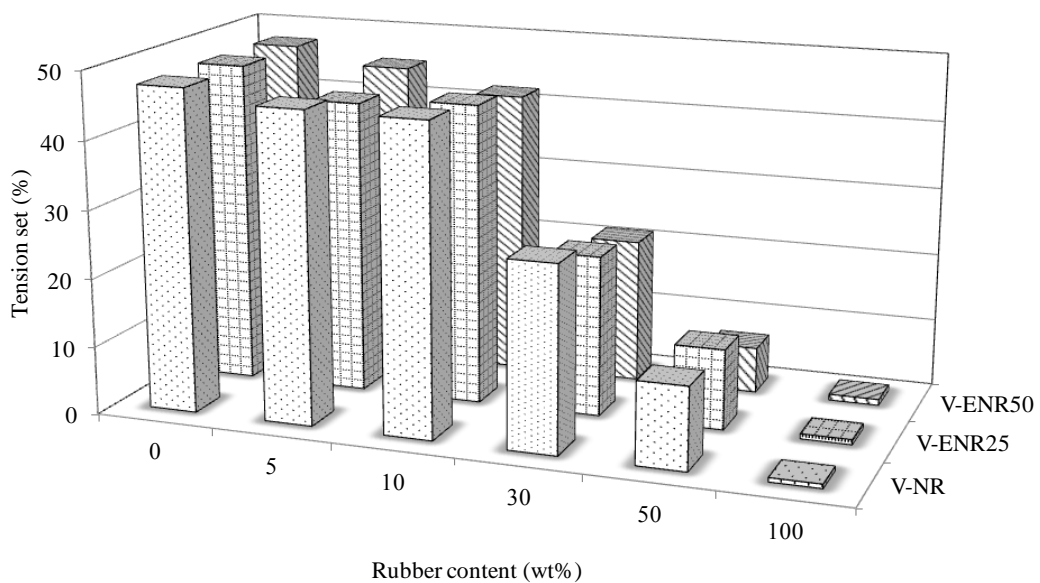


รูปที่ 4.30 การกระเดื่องตัวของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

ตารางที่ 4.48 การกระเด็งตัวของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

Rubber content (wt%)	Rebound resilience (%)		
	NR	ENR25	ENR50
0	52 ± 1	52 ± 1	52 ± 1
5	53 ± 2	52 ± 3	53 ± 1
10	50 ± 1	51 ± 1	52 ± 1
30	52 ± 1	53 ± 2	33 ± 2
50	54 ± 2	53 ± 1	20 ± 2
100	62 ± 3	54 ± 2	17 ± 1

ผลการทดสอบการยืดถาวรของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณยาง 0 – 100 wt% แสดงในรูปที่ 4.31 และตารางที่ 4.49 พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% มีเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่ปริมาณยาง 10 – 50 wt% พบว่า PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์มีเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรน้อยที่สุด แสดงว่า PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์สามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้มากที่สุด



รูปที่ 4.31 การยืดถาวรของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

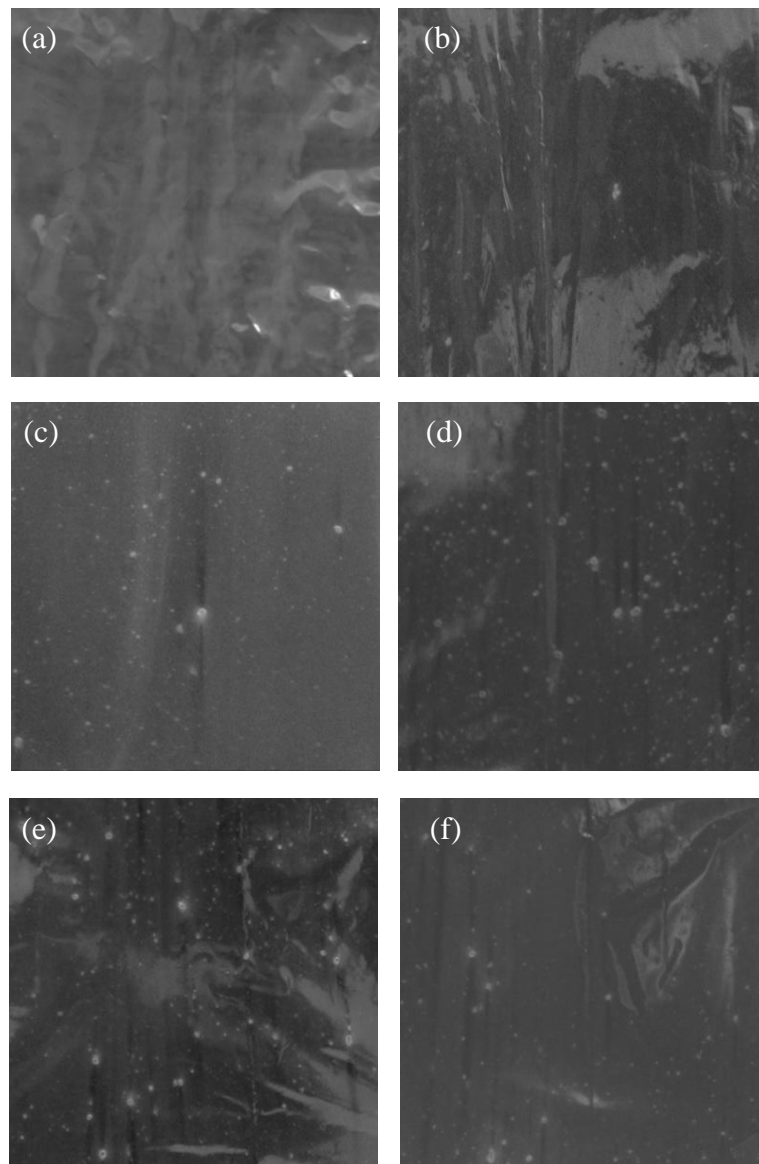
ตารางที่ 4.49 การยืดถาวรของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณยาง 0 – 100 wt%

Rubber content (wt%)	Tension set (%)		
	NR	ENR25	ENR50
0	47.44 ± 1.56	47.44 ± 1.56	47.44 ± 1.56
5	45.57 ± 0.62	43.08 ± 0.86	45.10 ± 0.92
10	45.38 ± 1.82	44.05 ± 1.60	41.93 ± 0.84
30	27.18 ± 0.95	23.53 ± 1.04	21.21 ± 0.78
50	12.05 ± 1.56	11.78 ± 1.37	6.71 ± 0.66
100	0.62 ± 0.07	0.75 ± 0.17	0.86 ± 0.08

ดังนั้นจากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณยางวัลคาไนซ์ พบว่า ที่ปริมาณยางวัลคาไนซ์ 10 wt% ของทั้งยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ยาง ENR25 วัลคาไนซ์ และยาง ENR50 วัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของยางวัลคาไนซ์พบว่า ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนว่า ยางวัลคาไนซ์ชนิดใดให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณยางวัลคาไนซ์ 10 wt% ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ยางวัลคาไนซ์แต่ละชนิดมีสมบัติดีที่สุด พบว่า PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์มีสมบัติความทนต่อแรงดึงมากที่สุด

4.3 फिल्मพอลิเมอร์ผสม

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมพบว่า PBAT ผสมยาง ENR25 มีสมบัติเชิงกลดีกว่า PBAT ผสมยาง ENR50 และ PBAT ผสมยางธรรมชาติ เมื่อนำ PBAT ผสมยาง ENR25 และ PBAT ผสมยาง ENR50 เป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มพบว่า ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ โดยผิวของฟิล์มที่เป่าได้ไม่เรียบ มีลักษณะเป็นเม็ด อาจเกิดจากการรวมตัวกันของยาง ENR ในขณะที่ทำการหลอมผสมในเครื่อง SSE แสดงในรูปที่ 4.32 สังเกตพบจุดสีขาว ซึ่งเป็นยาง ENR ที่รวมตัวกัน แต่ PBAT ผสมยางธรรมชาติสามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ จึงทำการศึกษาสมบัติของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ

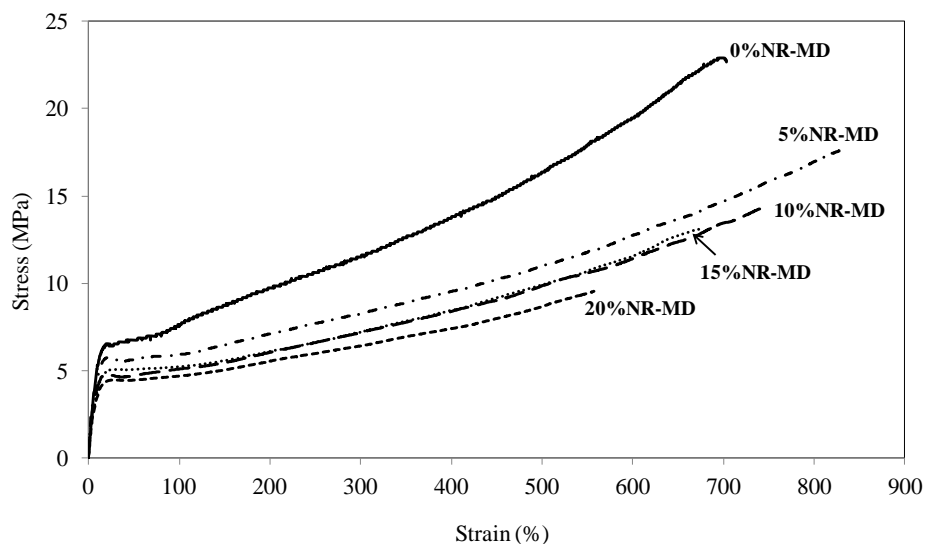


รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมยาง ENR: (a) ฟิล์ม PBAT (b) ฟิล์ม PBAT ผสมยาง ENR25 5 wt% (c) ฟิล์ม PBAT ผสมยาง ENR25 10 wt% (d) ฟิล์ม PBAT ผสมยาง ENR50 10 wt% (e) ฟิล์ม PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ 5 wt% และ (f) ฟิล์ม PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ 5 wt%

4.3.1 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT ผสมยางธรรมชาติ

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt% ทดสอบตามแนวเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.33 และตารางที่ 4.50 พบว่า ฟิล์มมีความหนาประมาณ 0.060 mm ค่า E และ ϵ_b ของฟิล์ม-

พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% มากกว่าฟิล์ม PBAT บริสุทธิ์ เนื่องจากสมบัติความเป็นอีลาสติกของยาง ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความเป็นอีลาสติกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่า ϵ_b มากขึ้น เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นเป็น 15 wt% และ 20 wt% ค่า ϵ_b ลดลง เนื่องจากปริมาณยางที่เพิ่มขึ้นทำให้มีรอยต่อระหว่างเฟสมากขึ้น ซึ่งเป็นจุดอ่อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทำให้เกิดการขาดได้ง่ายขึ้น จึงทำให้ค่า ϵ_b ลดลง ค่า σ_b ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมค่าน้อยกว่าฟิล์ม PBAT บริสุทธิ์ และเมื่อมีปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น ค่า E และ σ_b ลดลง เนื่องจากปริมาณยางที่เพิ่มขึ้นทำให้ส่วนที่นิ่มในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น (Mahapram *et al.*, 2011)



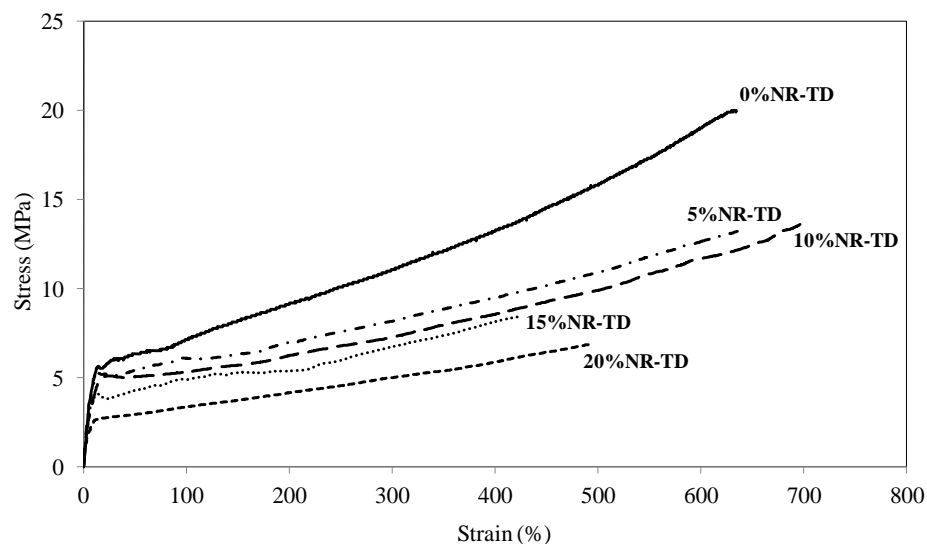
รูปที่ 4.33 กราฟความเค้น – ความเครียดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติทดสอบตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD)

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt% ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.34 และตารางที่ 4.51 พบว่า ความหนาของฟิล์มมีค่าประมาณ 0.060 mm ค่า E ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% มากกว่าฟิล์ม PBAT บริสุทธิ์ ค่า σ_b ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมน้อยกว่าฟิล์ม PBAT บริสุทธิ์ และค่า ϵ_b ของฟิล์ม PBAT บริสุทธิ์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นเป็น 15 wt% และ 20 wt% ค่า E, σ_y , σ_b และ ϵ_b ลดลงเนื่องจากปริมาณยางที่เพิ่มขึ้นทำให้ส่วนที่นิ่มในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น และปริมาณยางที่

เพิ่มขึ้น ทำให้มีรอยต่อระหว่างเฟสมากขึ้น ซึ่งเป็นจุดอ่อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทำให้เกิดการขาดได้ง่ายขึ้น จึงทำให้ค่า E , σ_y , σ_b และ ϵ_b ลดลง

ตารางที่ 4.50 สมบัติความทนต่อแรงดึงและความหนาของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt% ทดสอบตามแนวเครื่องจักร

Rubber content (wt%)	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
0	0.056±0.001	43.02±2.26	5.81±0.49	18.53±1.59	21.94±1.50	693±42
5	0.056±0.005	54.34±2.35	5.81±0.31	21.49±1.12	17.67±1.14	834±35
10	0.053±0.003	52.72±1.39	4.63±0.18	19.22±1.47	14.22±1.03	764±37
15	0.063±0.003	32.97±1.22	4.31±0.50	22.48±2.34	11.92±1.52	675±55
20	0.059±0.003	32.33±0.68	4.23±0.27	22.37±2.98	9.28±0.71	561±35



รูปที่ 4.34 กราฟความเค้น – ความเครียดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร (transverse direction, TD)

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt% แสดงตารางที่ 4.52 พบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง

ธรรมชาติ 5 wt% และ 10 wt% มากกว่าฟิล์ม PBAT บริสุทธิ์ แต่เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นเป็น 15 wt% และ 20 wt% พบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง ทั้งการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร

ตารางที่ 4.51 สมบัติความทนต่อแรงดึงและความหนาของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt% ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

Rubber content (wt%)	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
0	0.056±0.001	39.25±1.25	5.28±0.43	10.43±0.69	19.37±1.53	635±53
5	0.056±0.005	52.87±1.39	5.33±0.42	13.59±1.60	13.87±0.79	629±33
10	0.053±0.003	48.51±4.52	4.98±0.30	20.54±2.12	13.29±1.20	686±47
15	0.063±0.003	39.81±2.93	4.27±0.54	16.02±2.58	8.52±0.50	431±23
20	0.059±0.003	27.57±1.63	2.83±0.29	8.03±0.75	7.01±0.78	490±47

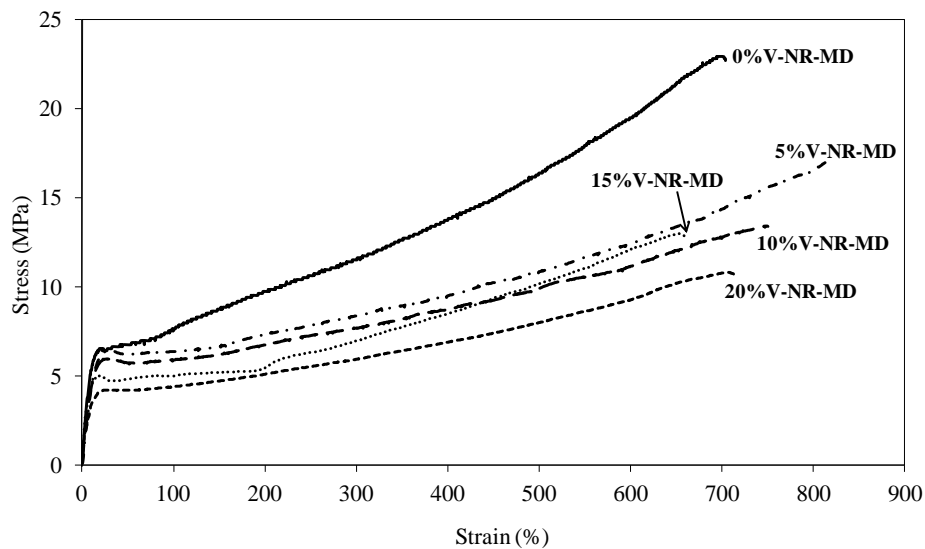
ตารางที่ 4.52 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt%

NR content (wt%)	Tear strength (N/mm)	
	MD	TD
0	81 ± 5	69 ± 6
5	93 ± 1	94 ± 3
10	85 ± 2	77 ± 2
15	59 ± 4	60 ± 1
20	63 ± 2	57 ± 3

4.3.2 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt% ทดสอบตามแนวเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.35 และตารางที่ 4.53 พบว่า ความหนาของฟิล์มมีค่าประมาณ 0.060 mm ค่า E, σ_y , ϵ_y และ

ϵ_b ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมากกว่า PBAT บริสุทธิ์ เนื่องจากสมบัติความเป็นอิลาสติกของยาง ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความเป็นอิลาสติกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่า ϵ_b มากขึ้น ค่า σ_b ของฟิล์ม-พอลิเมอร์ผสมมีค่าน้อยกว่าฟิล์มของ PBAT บริสุทธิ์ และเมื่อมีปริมาณยางเพิ่มมากขึ้น ค่า E , σ_y , σ_b และ ϵ_b ลดลง เนื่องจากปริมาณยางที่เพิ่มขึ้น ทำให้ส่วนที่นุ่มในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นและปริมาณยางที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีรอยต่อระหว่างเฟสมากขึ้น ซึ่งเป็นจุดอ่อนของฟิล์ม-พอลิเมอร์ผสมทำให้เกิดการขาดได้ง่ายขึ้น จึงทำให้ค่า E , σ_y , σ_b และ ϵ_b ลดลง

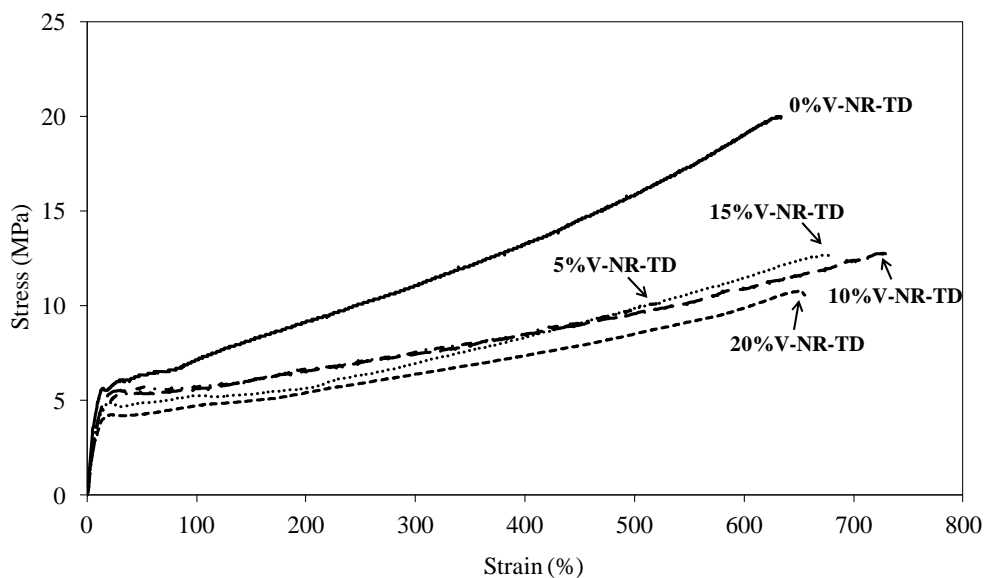


รูปที่ 4.35 กราฟความเค้น – ความเครียดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร

ตารางที่ 4.53 สมบัติความทนต่อแรงดึงและความหนาของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ-วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt% ทดสอบตามแนวเครื่องจักร

V-NR content (wt%)	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
0	0.056±0.001	43.02±2.26	5.81±0.49	18.53±1.59	21.94±1.50	693±42
5	0.056±0.002	61.15±1.64	6.30±0.14	27.90±1.74	16.86±0.69	821±26
10	0.056±0.002	56.87±2.06	6.03±0.44	27.56±1.77	14.05±0.93	749±29
15	0.062±0.006	42.58±2.62	4.87±0.17	21.11±1.53	12.58±1.22	657±52
20	0.058±0.002	32.43±2.63	4.19±0.32	22.83±0.60	11.57±1.58	699±51

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับ ยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt% ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงใน รูปที่ 4.36 และตารางที่ 4.54 พบว่า ความหนาของฟิล์มมีค่าประมาณ 0.060 mm ค่า E ของ ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 5 wt% 10 wt% และ 15 wt% มากกว่า PBAT บริสุทธิ์ ค่า σ_b ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมน้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ และค่า ϵ_b ที่ปริมาณ ยางวัลคาไนซ์ 10 wt% มากกว่า PBAT บริสุทธิ์ ขณะที่ที่ปริมาณยางวัลคาไนซ์ 5 wt% 15 wt% และ 20 wt% มีค่าใกล้เคียงกับ PBAT บริสุทธิ์ เมื่อปริมาณยางวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ค่า E ลดลง ค่า σ_b ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.36 กราฟความเค้น – ความเครียดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติความทนต่อแรงดึงระหว่างฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติและ PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่ทดสอบตามแนวเครื่องจักร แสดงในตารางที่ 4.55 พบว่าค่า E ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติน้อยกว่าฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ค่า σ_b และ ϵ_b ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติกับฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่ปริมาณยาง 20 wt% พบว่าค่า σ_b และ ϵ_b ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มากกว่าฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ

ตารางที่ 4.54 สมบัติความทนต่อแรงดึงและความหนาของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ-วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt% ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

V-NR content (wt%)	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
0	0.056±0.001	39.25±1.25	5.28±0.43	10.43±0.69	19.37±1.53	635±53
5	0.056±0.002	55.05±1.04	5.25±0.14	10.43±0.79	9.87±0.89	520±33
10	0.056±0.002	53.44±2.79	5.52±0.24	28.65±1.40	12.74±0.41	748±21
15	0.062±0.006	43.01±1.72	5.00±0.11	20.33±0.59	12.24±1.19	666±53
20	0.058±0.002	31.49±0.89	4.37±0.36	22.25±1.21	11.04±1.03	644±44

ตารางที่ 4.55 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร

Rubber content (wt%)	E (MPa)		σ_b (MPa)		ϵ_b (%)	
	NR	V-NR	NR	V-NR	NR	V-NR
5	54.34±2.35	61.15±1.64	17.67±1.14	16.86±0.69	834±35	821±26
10	52.72±1.39	56.87±2.06	14.22±1.03	14.05±0.93	764±37	749±29
15	32.97±1.22	42.58±2.62	11.92±1.52	12.58±1.22	674±55	657±52
20	32.33±0.68	32.43±2.63	9.28±0.71	11.57±1.58	561±35	699±51

สำหรับผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักรแสดงในตารางที่ 4.56 พบว่า ค่า E ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติน้อยกว่าของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ สำหรับค่า σ_b และ ϵ_b พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% ฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ค่า σ_b และ ϵ_b น้อยกว่าฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่ปริมาณยาง 10 wt% ฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติและฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มีค่า σ_b และ ϵ_b ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ปริมาณยาง 15 wt% และ 20 wt% พบว่าค่า σ_b และ ϵ_b ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มากกว่าฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 0 – 20 wt% แสดงในตารางที่ 4.57 พบว่า ในการทดสอบตามแนวเครื่องจักร ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ

ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมน้อยกว่าฟิล์ม PBAT บริสุทธิ์ และความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง เมื่อปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักรพบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยาง 5 wt% มากกว่าฟิล์ม PBAT บริสุทธิ์ และเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง

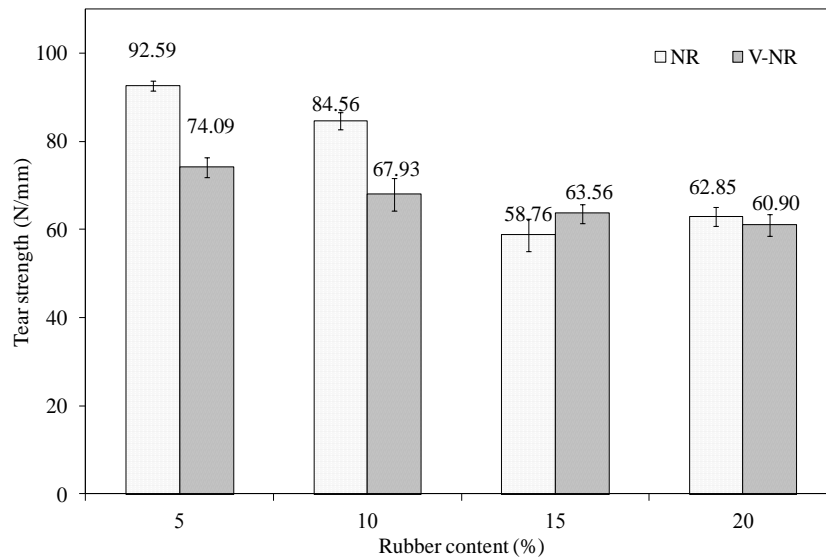
ตารางที่ 4.56 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

Rubber content (wt%)	E (MPa)		σ_b (MPa)		ϵ_b (%)	
	NR	V-NR	NR	V-NR	NR	V-NR
5	52.87±1.39	55.05±1.04	13.87±0.79	9.87±0.89	629±33	520±33
10	48.51±4.52	53.44±2.79	13.29±1.20	12.74±0.41	686±47	748±21
15	39.81±2.93	43.01±1.72	8.52±0.50	12.24±1.19	431±23	666±54
20	27.57±1.63	31.49±0.89	7.01±0.78	11.04±1.03	490±47	645±44

ตารางที่ 4.57 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

Rubber content (wt%)	Tear strength (N/mm)	
	MD	TD
0	81 ± 5	69 ± 6
5	74 ± 2	75 ± 3
10	68 ± 4	68 ± 2
15	64 ± 2	64 ± 1
20	61 ± 2	66 ± 3

เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานต่อการฉีกขาดระหว่างฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติกับฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ทดสอบตามแนวเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.37 และตารางที่ 4.58 พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% ฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาดมากกว่าของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ แต่ที่ปริมาณยาง 15 wt% และ 20 wt% มีความต้านทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.37 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ทดสอบตามแนวเครื่องจักร

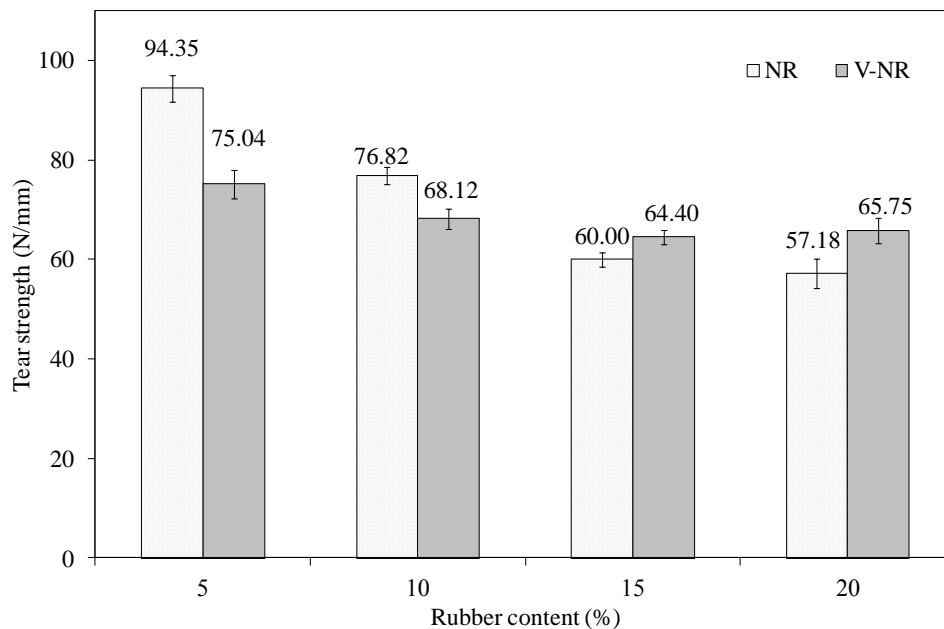
ตารางที่ 4.58 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ทดสอบตามแนวเครื่องจักร

Rubber content (wt%)	Tear strength (N/mm)	
	NR	V-NR
5	93 ± 1	74 ± 2
10	85 ± 2	68 ± 4
15	59 ± 4	64 ± 2
20	63 ± 2	61 ± 2

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักรแสดงในรูปที่ 4.38 และตารางที่ 4.59 พบว่า ที่ปริมาณยาง 5 wt% และ 10 wt% ฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาดมากกว่าของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ แต่ที่ปริมาณยาง 15 wt% และ 20 wt% ฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาดน้อยกว่าของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

จากการทดสอบพบว่า การเติมยางธรรมชาติช่วยให้สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ง่ายกว่าการเป่าขึ้นรูป PBAT บริสุทธิ์ และยังช่วยป้องกันการติดกันเองของฟิล์มในขณะม้วนเก็บ

ด้วย อีกทั้งยังเป็นการลดต้นทุนในการผลิตฟิล์ม PBAT เนื่องจากเม็ด PBAT มีราคา กิโลกรัมละ 300 บาท ขณะที่ยางธรรมชาติมีราคา กิโลกรัมละ 100 – 200 บาท ซึ่งจากการทดลองพบว่า สามารถเติมยางธรรมชาติได้ถึง 10 wt% สำหรับการผลิตเป็นฟิล์มคลุมดิน



รูปที่ 4.38 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติและยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

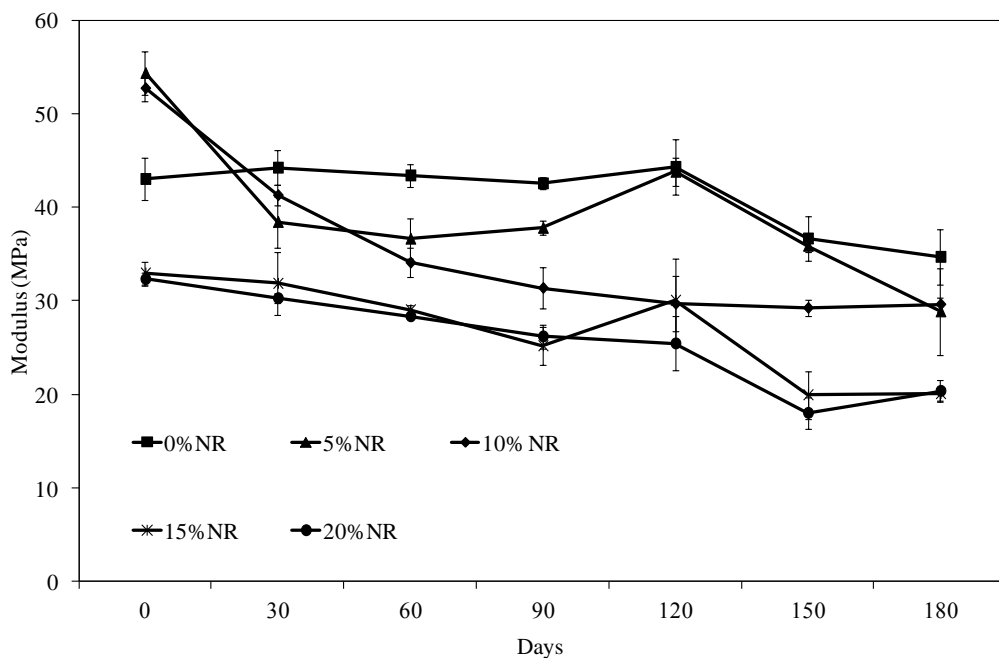
ตารางที่ 4.59 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติและยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

Rubber content (wt%)	Tear strength (N/mm)	
	NR	V-NR
5	94 ± 3	75 ± 3
10	77 ± 2	68 ± 2
15	60 ± 1	64 ± 1
20	57 ± 3	66 ± 3

4.4 ผลการทดสอบความสามารถในการย่อยสลาย

4.4.1 ฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ

ค่า E ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ แปรปริมาณยางธรรมชาติในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเป็น 0 – 20 wt% หลังจากฝังดินเป็นเวลา 0 – 180 วัน แสดงในรูปที่ 4.39 และตารางที่ 4.60 และตารางที่ 4.61 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า E ของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ พบว่า ค่า E ของฟิล์ม PBAT ลดลงอย่างช้าๆ ในช่วง 120 วันแรกและลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อฝังดินเป็นระยะเวลา 150 วัน แต่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณยางธรรมชาติ 5 wt% และ 10 wt% พบว่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อฝังดินเพียง 30 วันและค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น สำหรับที่ปริมาณยางธรรมชาติ 15 wt% และ 20 wt% พบว่าค่า E ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อฝังดิน 60 วันและค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น จากลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าฟิล์ม PBAT บริสุทธิ์มีการเสื่อมสภาพช้ากว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม สอดคล้องกับภาพถ่ายฟิล์มที่ทำการฝังดิน



รูปที่ 4.39 มอดุลัสของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%

ค่า σ_b ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติมีปริมาณยาง 0 – 20 wt% หลังจากการฝังดิน แสดงในรูปที่ 4.40 และตารางที่ 4.62 และตารางที่ 4.63 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า σ_b ของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ พบว่า ค่า σ_b ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่เตรียมได้ลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากที่ฝังดินเพียง 30 วัน และค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.60 มอดุลัสของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%

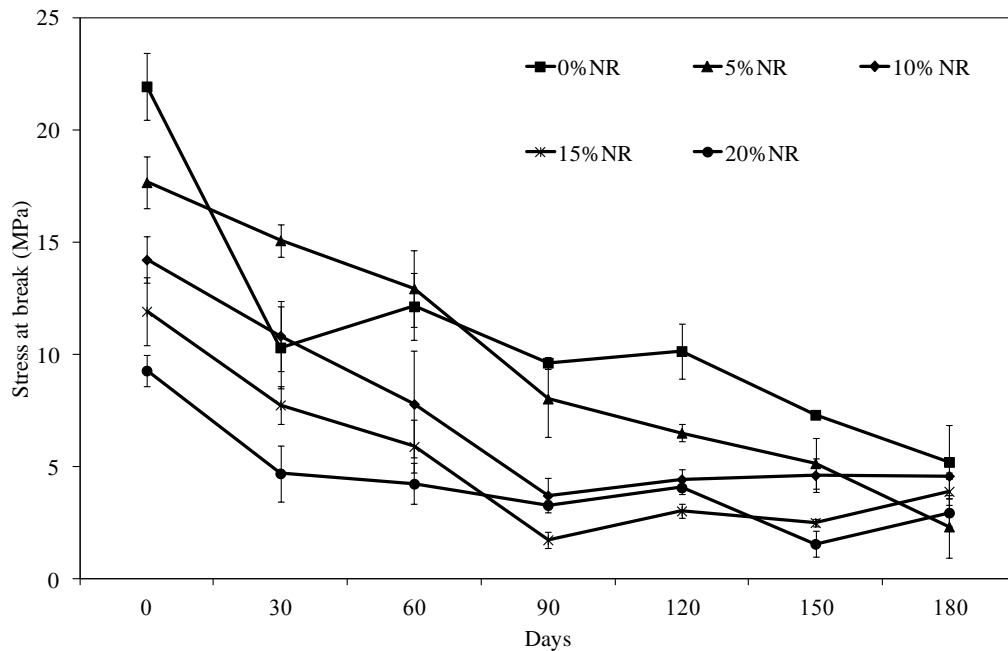
NR content (wt%)	Modulus (MPa) at						
	0 day	30 days	60 days	90 days	120 days	150 days	180 days
0	43 ± 2	44 ± 2	43 ± 1	43 ± 1	44 ± 3	37 ± 2	35 ± 3
5	54 ± 2	38 ± 3	37 ± 2	38 ± 1	44 ± 2	36 ± 1	29 ± 5
10	53 ± 1	41 ± 1	34 ± 2	31 ± 2	30 ± 3	30 ± 1	30 ± 1
15	33 ± 1	32 ± 3	29 ± 1	25 ± 2	30 ± 4	20 ± 3	20 ± 1
20	32 ± 1	30 ± 1	28 ± 1	26 ± 1	25 ± 3	18 ± 2	20 ± 1

ตารางที่ 4.61 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า E ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%

NR content (wt%)	ΔE (%) at					
	30 days	60 days	90 days	120 days	150 days	180 days
0	2.81	0.88	-1.09	3.00	-14.78	-19.34
5	-29.28	-32.57	-30.44	-19.41	-33.97	-46.87
10	-21.68	-35.36	-40.48	-43.70	-44.52	-43.80
15	-3.34	-11.92	-23.57	-8.83	-39.46	-39.07
20	-6.34	-12.31	-18.96	-21.28	-44.23	-36.96

ค่า ϵ_b ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt% หลังจากการฝังดิน แสดงในรูปที่ 4.41 และตารางที่ 4.64 และตารางที่ 4.65 แสดงเปอร์เซ็นต์

การเปลี่ยนแปลงค่า ϵ_b ของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ พบว่า ϵ_b ของฟิล์ม PBAT ค่อยๆ ลดลงในช่วง 120 วันแรกแต่เมื่อฝังดินเป็นเวลา 150 วัน พบว่า ค่า ϵ_b ลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะที่ฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่เตรียมได้ พบว่า ค่า ϵ_b ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 120 วันแรกและค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาการฝังดินเพิ่มขึ้น



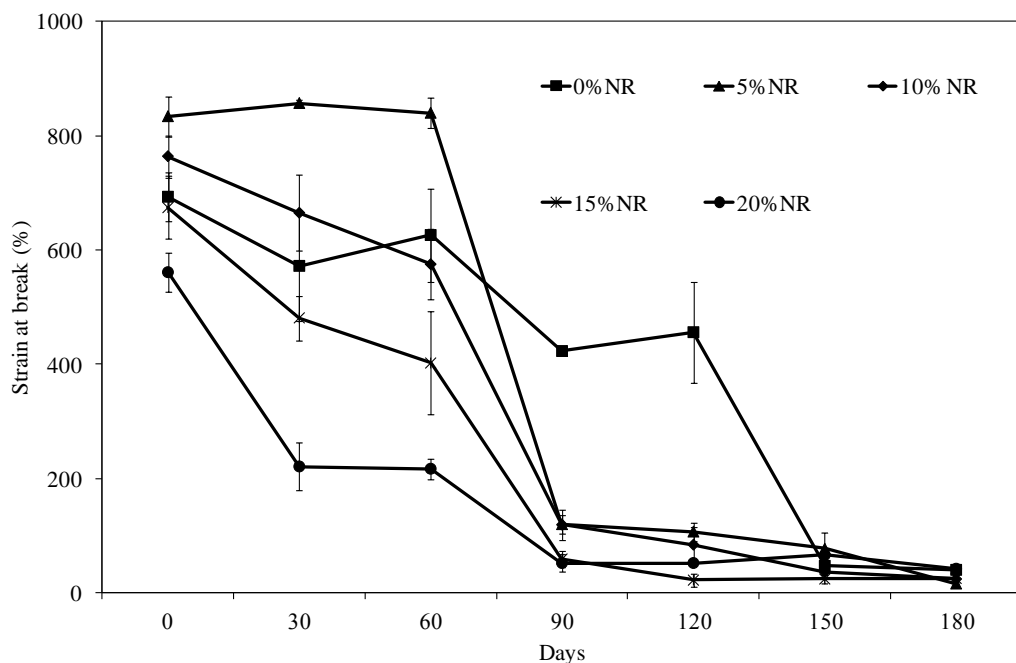
รูปที่ 4.40 ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%

ตารางที่ 4.62 ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%

NR content (wt%)	Stress at break (MPa) at						
	0 day	30 days	60 days	90 days	120 days	150 days	180 days
0	22 ± 2	10 ± 2	12 ± 1	10 ± 1	10 ± 1	7 ± 1	5 ± 2
5	18 ± 1	15 ± 1	13 ± 2	8 ± 2	7 ± 1	5 ± 1	2 ± 1
10	14 ± 1	11 ± 2	8 ± 2	4 ± 1	4 ± 1	5 ± 1	5 ± 1
15	12 ± 2	8 ± 1	6 ± 1	2 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	4 ± 1
20	9 ± 1	5 ± 1	4 ± 1	3 ± 1	4 ± 1	2 ± 1	3 ± 1

ตารางที่ 4.63 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า σ_b ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%

NR content (wt%)	$\Delta\sigma_b$ (%) at					
	30 days	60 days	90 days	120 days	150 days	180 days
0	-53.01	-44.67	-56.11	-53.74	-66.68	-76.25
5	-14.66	-26.77	-54.56	-63.16	-70.85	-86.81
10	-23.84	-45.22	-73.84	-68.78	-67.51	-67.72
15	-34.98	-50.50	-85.40	-74.58	-78.94	-67.28
20	-49.35	-54.31	-64.55	-56.14	-83.19	-68.21



รูปที่ 4.41 ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%

ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 20 wt% หลังจากการฝังดิน แสดงในรูปที่ 4.42 – 4.46 พบว่าฟิล์ม PBAT เริ่มมีจุดสีขาวขุ่นเมื่อฝังดินเป็นระยะเวลา 90 วันและเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการฝังดินนานขึ้น แต่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติพบว่า เริ่มมีจุดสีขาวเมื่อฝังดินเป็นระยะเวลา 60 วันและเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการฝังดินเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ปริมาณของจุดสีขาวเพิ่มขึ้น

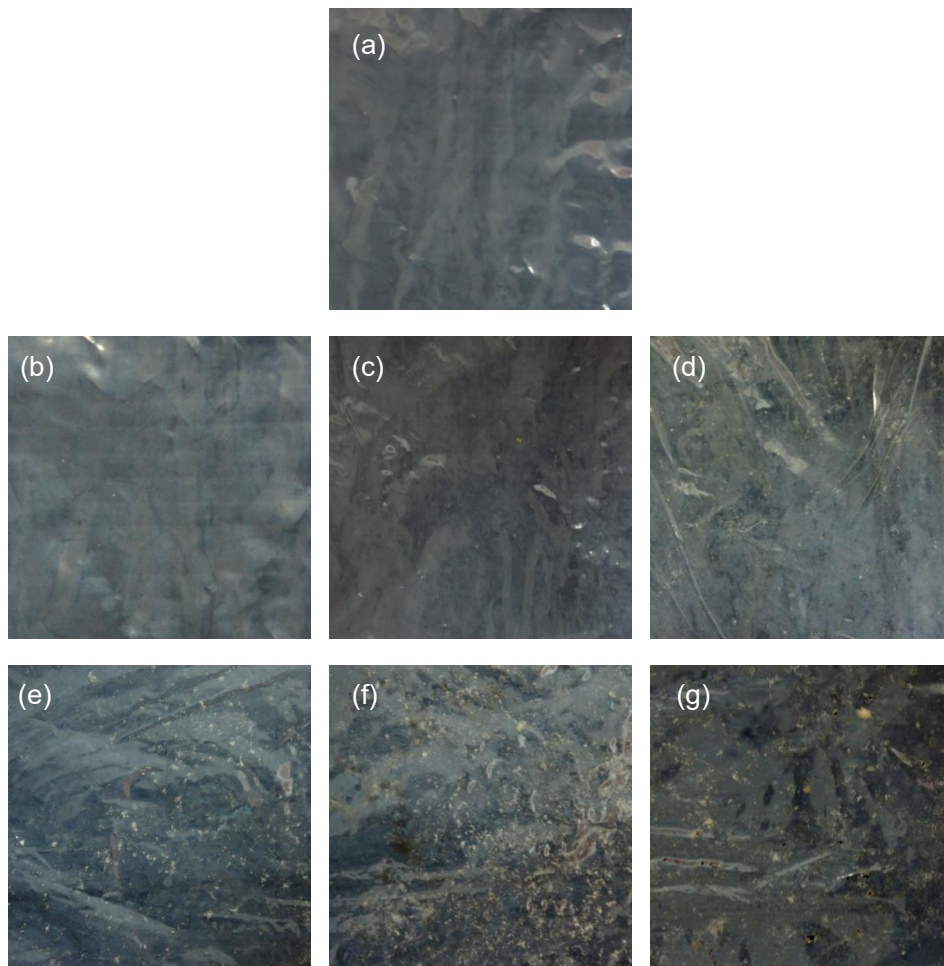
และมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย และจากการทดสอบความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม-พอลิเมอร์ผสมพบว่าการขาดของฟิล์มเริ่มขาดจากจุดสีขาว สำหรับฟิล์มมีจุดสีขาวมากและมีขนาดใหญ่ก็จะทำให้ฟิล์มมีความทนต่อแรงดึงน้อยกว่าฟิล์มที่มีจุดสีขาวน้อยหรือไม่มีจุดสีขาว ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kijchavengkul (Kijchavengkul, *et al.*, 2009) พบว่าฟิล์ม PBAT ที่ฝังดินไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อตรวจสอบด้วยสายตาจนกระทั่งฝังดิน 168 วัน พบรูและการกัดกร่อนที่ผิวฟิล์ม หลังจากนั้นเกิดกระบวนการย่อยสลายอย่างรวดเร็วในช่วง 224 – 273 วัน โดยฟิล์ม PBAT เริ่มเสียหาย เกิดรูและรอยแตก และผ่านไป 273 วัน พบว่า บางส่วนของฟิล์ม PBAT หายไป

ตารางที่ 4.64 ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%

NR content (wt%)	Strain at break (%) at						
	0 day	30 days	60 days	90 days	120 days	150 days	180 days
0	693±42	572±97	626±82	423±2	456±88	47±16	40±8
5	834±35	857±5	840±27	120±16	107±16	77±28	16±2
10	764±37	665±66	575±62	119±27	84±31	36±10	24±1
15	674±55	481±39	402±90	59±14	22±12	24±7	25±1
20	561±35	221±42	217±18	52±15	52±3	66±6	42±3

ตารางที่ 4.65 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า ϵ_b ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%

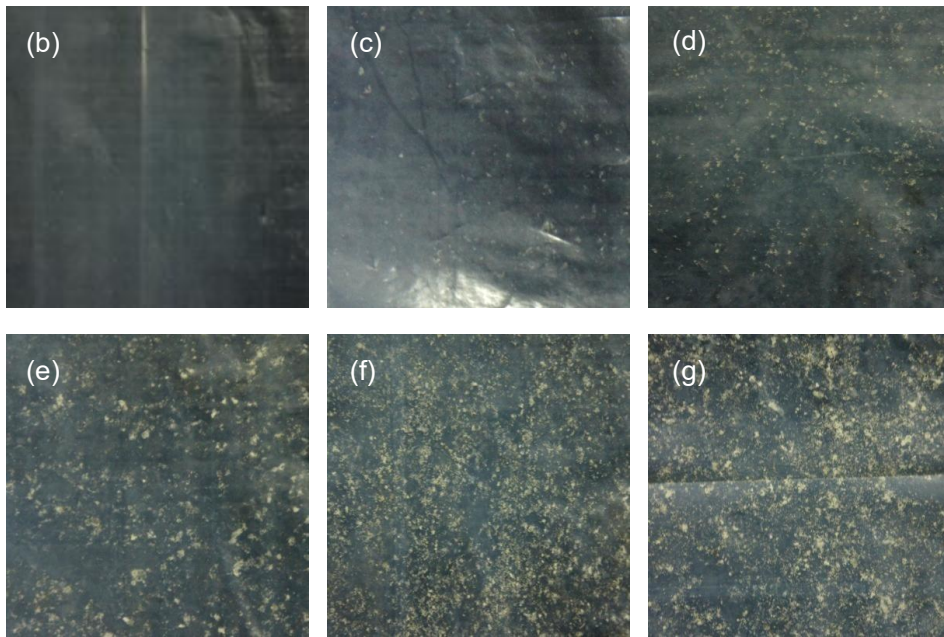
NR content (wt%)	$\Delta\epsilon_b$ (%) at					
	30 days	60 days	90 days	120 days	150 days	180 days
0	-17.46	-9.67	-38.96	-34.20	-93.22	-94.23
5	2.76	0.72	-85.61	-87.17	-90.77	-98.08
10	-12.96	-24.74	-84.42	-89.01	-95.29	-96.86
15	-28.64	-40.36	-91.25	-96.74	-96.44	-96.29
20	-60.61	-61.32	-90.73	-90.73	-88.24	-92.51



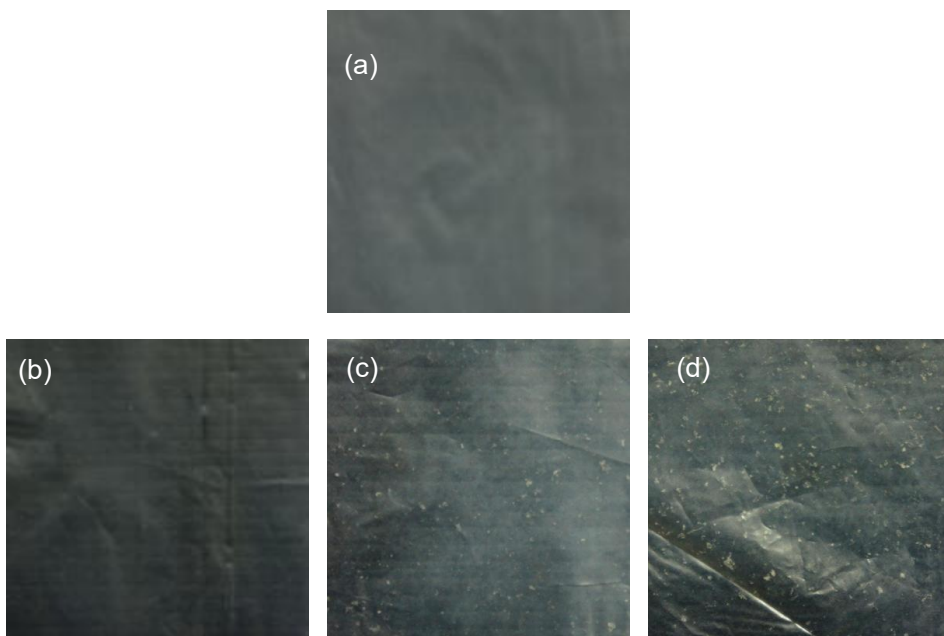
รูปที่ 4.42 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT: (a) ก่อนฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน



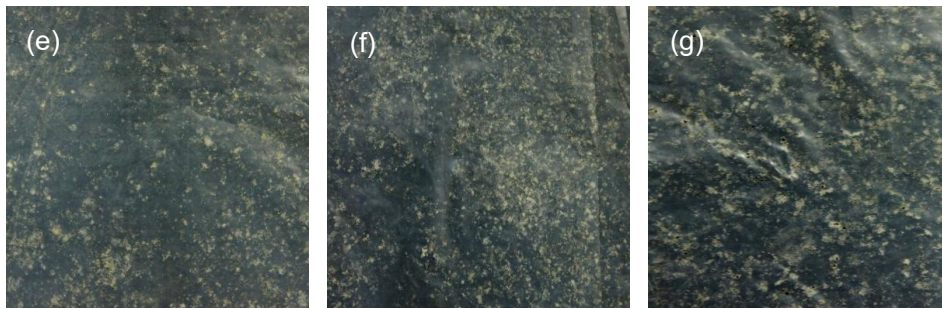
รูปที่ 4.43 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 5 wt: (a) ก่อนฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน



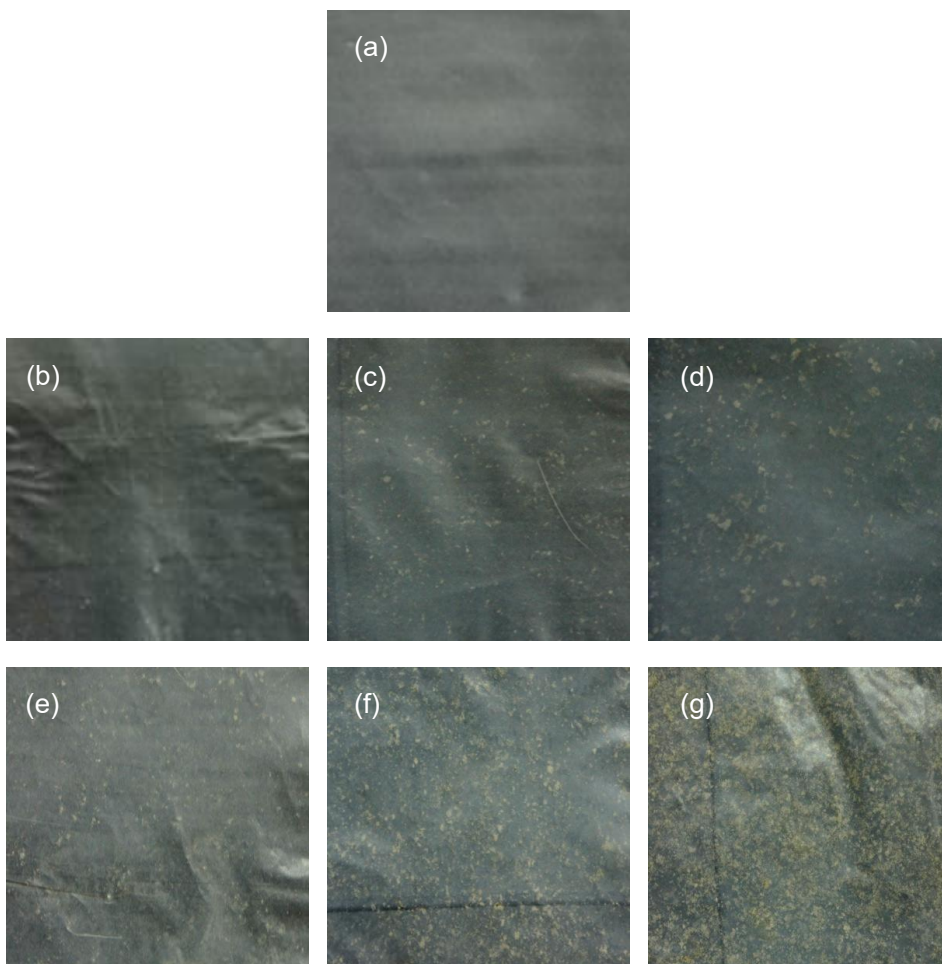
รูปที่ 4.43 (ต่อ)



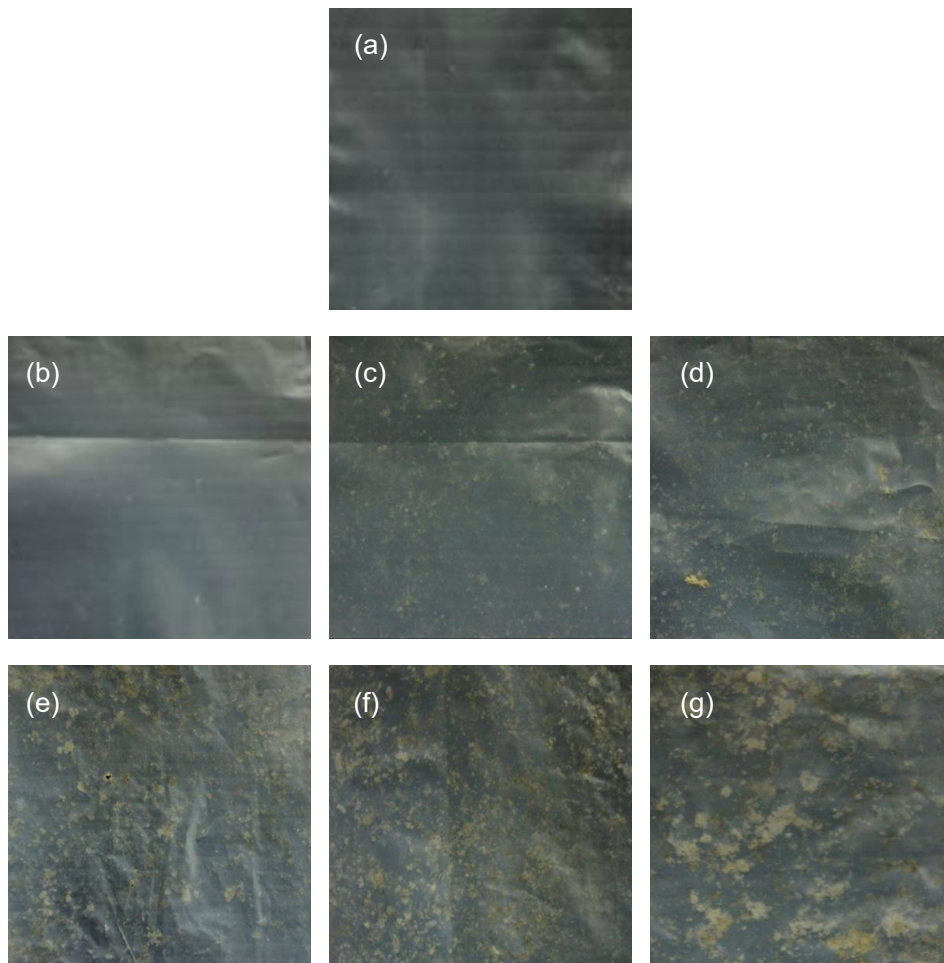
รูปที่ 4.44 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 10 wt%: (a) ก่อน
 ฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน
 (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน



รูปที่ 4.44 (ต่อ)



รูปที่ 4.45 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 15 wt%: (a) ก่อน
 ฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน
 (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน

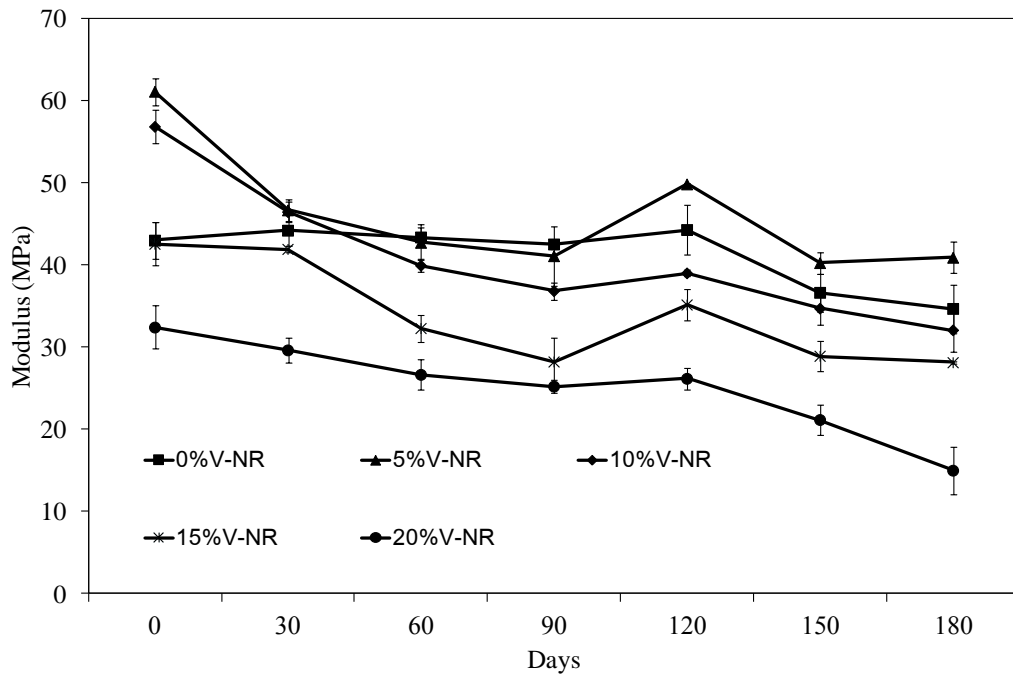


รูปที่ 4.46 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 20 wt%: (a) ก่อน
 ฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน
 (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน

4.4.2 ฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

ค่า E ของฟิล์ม PBAT และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ แปรปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเป็น 0 – 20 wt% หลังจากฝังดินเป็นเวลา 0 – 180 วัน แสดงในรูปที่ 4.47 และตารางที่ 4.66 และตารางที่ 4.67 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า E ของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ พบว่า ค่า E ของฟิล์ม PBAT ลดลงอย่างช้าๆในช่วง 120 วันแรกและลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อฝังดินเป็นระยะเวลา 150 วัน แต่ที่ปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 5 wt% และ 10 wt% พบว่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อฝังดินเพียง 30 วันและค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น

สำหรับที่ปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 15 wt% และ 20 wt% พบว่าค่า E ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อฝังดิน 60 วันและค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น จากลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าฟิล์ม PBAT บริสุทธิ์มีการเสื่อมสภาพช้ากว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.47 มอดุลัสของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 0 – 20 wt%

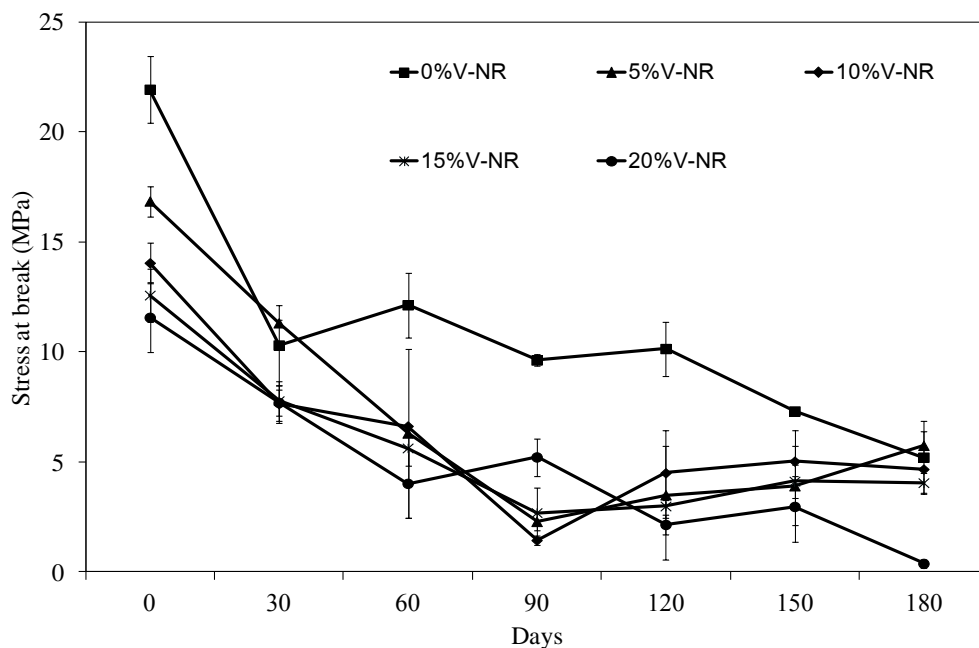
ตารางที่ 4.66 มอดุลัสของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 0 – 20 wt%

V-NR content (wt%)	Modulus (MPa) at						
	0 day	30 days	60 days	90 days	120 days	150 days	180 days
0	43 ± 2	44 ± 2	43 ± 1	43 ± 1	44 ± 3	37 ± 2	35 ± 3
5	61 ± 2	47 ± 1	43 ± 2	41 ± 4	50 ± 1	40 ± 1	41 ± 2
10	57 ± 2	46 ± 1	40 ± 1	37 ± 1	39 ± 1	35 ± 2	32 ± 3
15	43 ± 3	42 ± 1	32 ± 2	28 ± 3	35 ± 2	29 ± 2	28 ± 1
20	32 ± 3	30 ± 2	27 ± 2	25 ± 1	26 ± 1	21 ± 2	15 ± 3

ตารางที่ 4.67 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า E ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%

NR content (wt%)	ΔE (%) at					
	30 days	60 days	90 days	120 days	150 days	180 days
0	2.81	0.88	-1.09	3.00	-14.78	-19.34
5	-23.63	-30.09	-32.76	-18.46	-34.13	-33.07
10	-18.25	-29.73	-35.19	-31.37	-38.93	-43.57
15	-1.48	-24.12	-33.68	-17.38	-32.06	-33.89
20	-8.57	-17.76	-22.17	-19.24	-34.72	-53.75

ค่า σ_b ของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 5 – 20 wt% หลังจากการฝังดิน แสดงในรูปที่ 4.48 และตารางที่ 4.68 และตารางที่ 4.69 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า σ_b ของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ พบว่า ค่า σ_b ของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้ลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากที่ฝังดินเพียง 30 วันและค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.48 ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 0 – 20 wt%

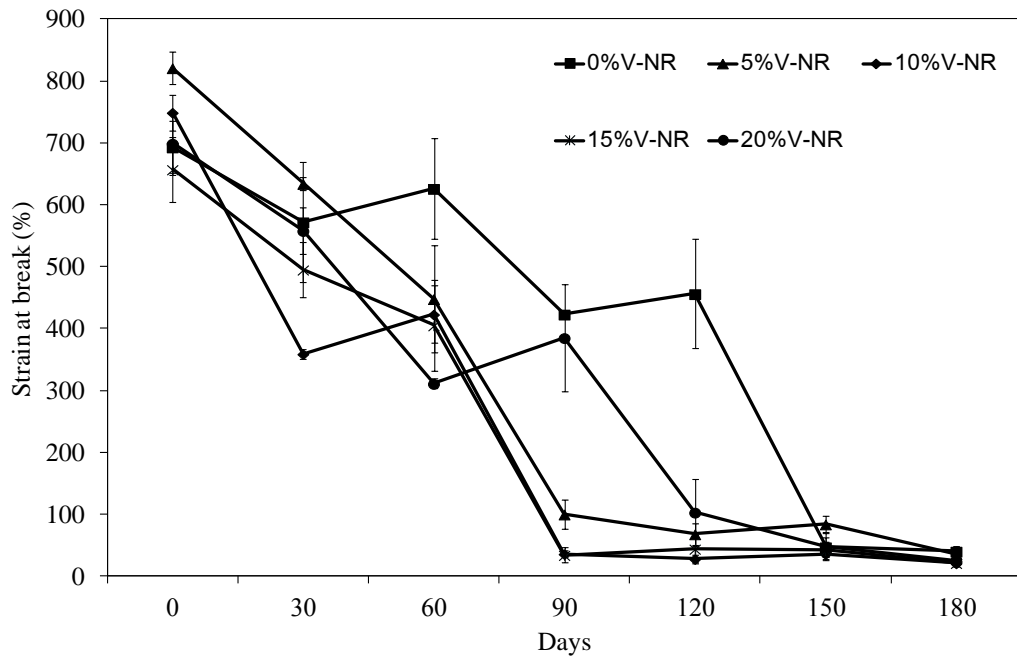
ตารางที่ 4.68 ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์หลังจาก
ฝังดินเป็นระยะเวลา 6 เดือนที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 0 – 20wt%

V-NR content (wt%)	Stress at break (MPa) at						
	0 day	30 days	60 days	90 days	120 days	150 days	180 days
0	22 ± 2	10 ± 2	12 ± 1	10 ± 1	10 ± 1	7 ± 1	5 ± 2
5	17 ± 1	11 ± 1	6 ± 4	2 ± 1	4 ± 3	4 ± 3	6 ± 1
10	14 ± 1	8 ± 1	7 ± 1	1 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1
15	13 ± 1	8 ± 1	6 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	4 ± 1	4 ± 1
20	12 ± 2	8 ± 1	4 ± 2	5 ± 1	2 ± 1	3 ± 1	2 ± 1

ตารางที่ 4.69 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่า σ_b ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจาก
ฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%

NR content (wt%)	$\Delta\sigma_b$ (%) at					
	30 days	60 days	90 days	120 days	150 days	180 days
0	-53.01	-44.67	-56.11	-53.74	-66.68	-76.25
5	-32.86	-62.57	-86.42	-79.24	-76.81	-65.90
10	-45.62	-52.81	-89.75	-67.97	-64.20	-66.76
15	-38.16	-55.25	-78.62	-76.23	-67.25	-67.81
20	-33.45	-65.25	-54.88	-81.42	-74.33	-96.72

ค่า ϵ_b ของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มี
ปริมาณยาง 5 – 20 wt% หลังการฝังดิน แสดงในรูปที่ 4.49 และตารางที่ 4.70 และตาราง
ที่ 4.71 แสดงเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่า ϵ_b ของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสม
ยางธรรมชาติ พบว่า ค่า ϵ_b ของฟิล์ม PBAT ค่อยๆ ลดลงในช่วง 120 วันแรก แต่เมื่อฝังดิน
เป็นเวลา 150 วันพบว่าค่า ϵ_b ลดลงอย่างรวดเร็ว สำหรับฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคา-
ไนซ์ที่เตรียมได้พบว่า ค่า ϵ_b ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 90 วันแรกและค่อยๆ ลดลงเมื่อ
ระยะเวลาการฝังดินเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.49 ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์หลังจากฝังดิน เป็นระยะเวลา 0 – 180 วัน เดือนที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 0 – 20 wt%

ตารางที่ 4.70 ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์หลังจาก ฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วัน ที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 0 – 20 wt%

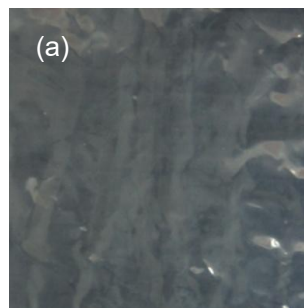
V-NR content (wt%)	Strain at break (%) at						
	0 day	30 days	60 days	90 days	120 days	150 days	180 days
0	693 ± 42	572 ± 97	626 ± 82	423 ± 2	456 ± 88	47 ± 16	40 ± 8
5	821 ± 26	634 ± 10	448 ± 86	100 ± 23	68 ± 17	84 ± 13	36 ± 5
10	749 ± 29	359 ± 8	423 ± 46	36 ± 5	28 ± 7	36 ± 9	21 ± 1
15	657 ± 52	495 ± 44	405 ± 73	34 ± 12	44 ± 22	43 ± 12	21 ± 5
20	699 ± 51	558 ± 38	311 ± 8	385 ± 87	103 ± 54	48 ± 22	24 ± 1

ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มี ปริมาณยาง 0 – 20 wt% หลังจากการฝังดิน รูปที่ 4.50 – 4.54 พบว่าฟิล์ม PBAT เริ่มมีจุดลี

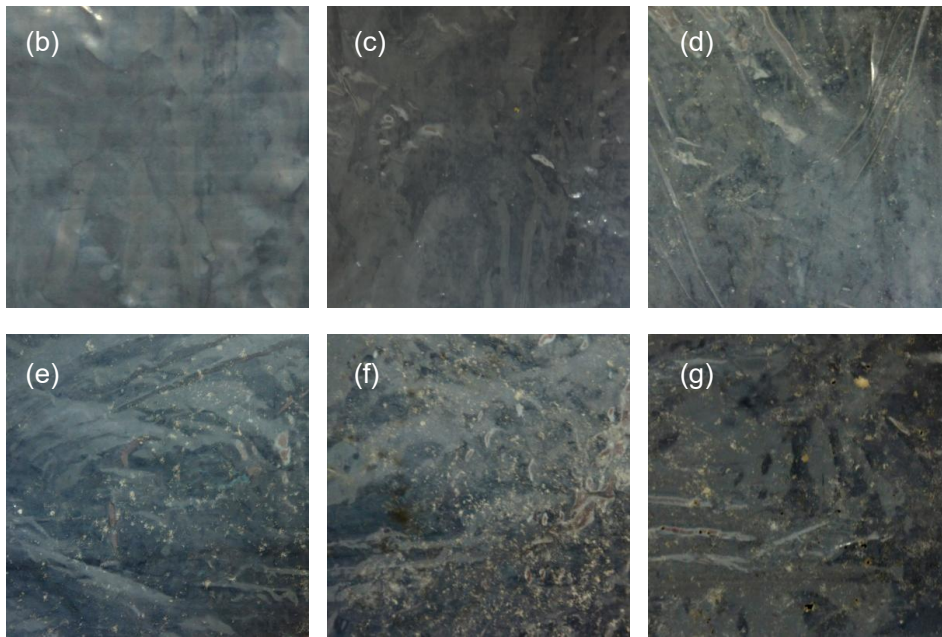
ขาวขุ่นเมื่อ ฝังดินเป็นระยะเวลา 90 วันและเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการฝังดินนานขึ้น แต่ฟิล์ม-พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์พบว่าเริ่มมีจุดสีขาวเมื่อฝังดินเป็นระยะเวลา 60 วันและเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการฝังดินเพิ่มขึ้นและเมื่อปริมาณยางธรรมชาติ-วัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นพบว่า ปริมาณจุดสีขาวเพิ่มขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ซึ่งจากการทดสอบความทนต่อแรงดึงของ ฟิล์ม PBAT และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพบว่า การขาดของฟิล์มเริ่มขาดจากจุดสีขาว สำหรับฟิล์มมีจุดสีขาวมากและมีขนาดใหญ่ก็จะทำให้ฟิล์มมีความทนต่อแรงดึงน้อยกว่าฟิล์มที่มีจุดสีขาวน้อยหรือไม่มีจุดสีขาว เช่นเดียวกับฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ทำให้การย่อยสลายของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าฟิล์ม PBAT บริสุทธิ์

ตารางที่ 4.71 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่า ϵ_b ของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 0 – 180 วันที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 0 – 20 wt%

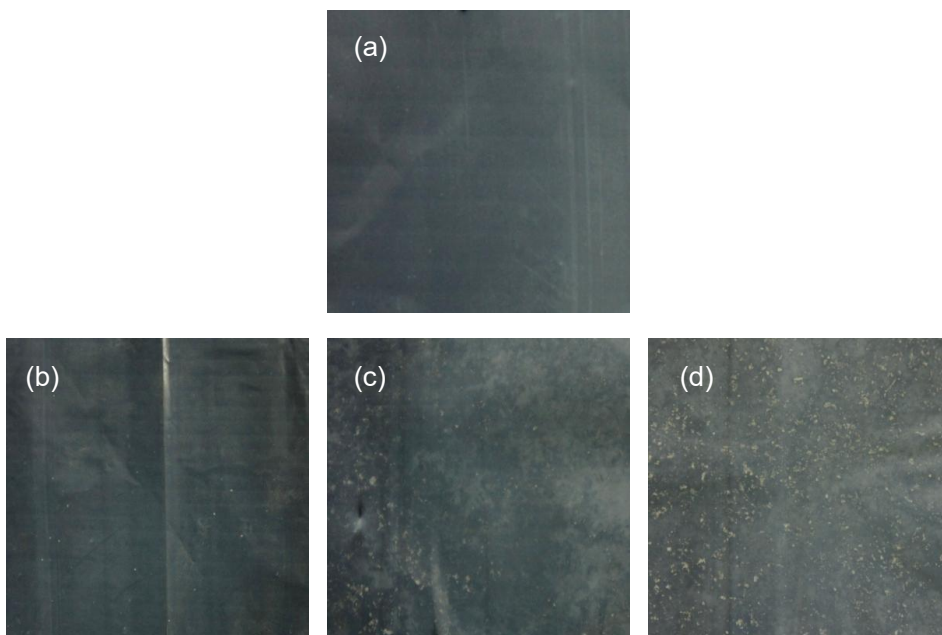
NR content (wt%)	$\Delta\epsilon_b$ (%) at					
	30 days	60 days	90 days	120 days	150 days	180 days
0	-17.46	-9.67	-38.96	-34.20	-93.22	-94.23
5	-22.78	-45.43	-87.82	-91.72	-89.77	-95.62
10	-52.07	-43.52	-95.19	-96.26	-95.19	-97.20
15	-24.66	-38.36	-94.82	-93.30	-93.46	-96.80
20	-20.17	-55.51	-44.92	-85.26	-93.13	-96.57



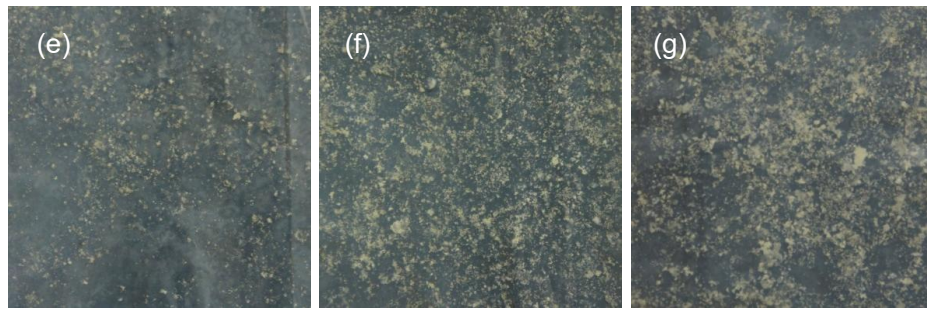
รูปที่ 4.50 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT: (a) ก่อนฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน



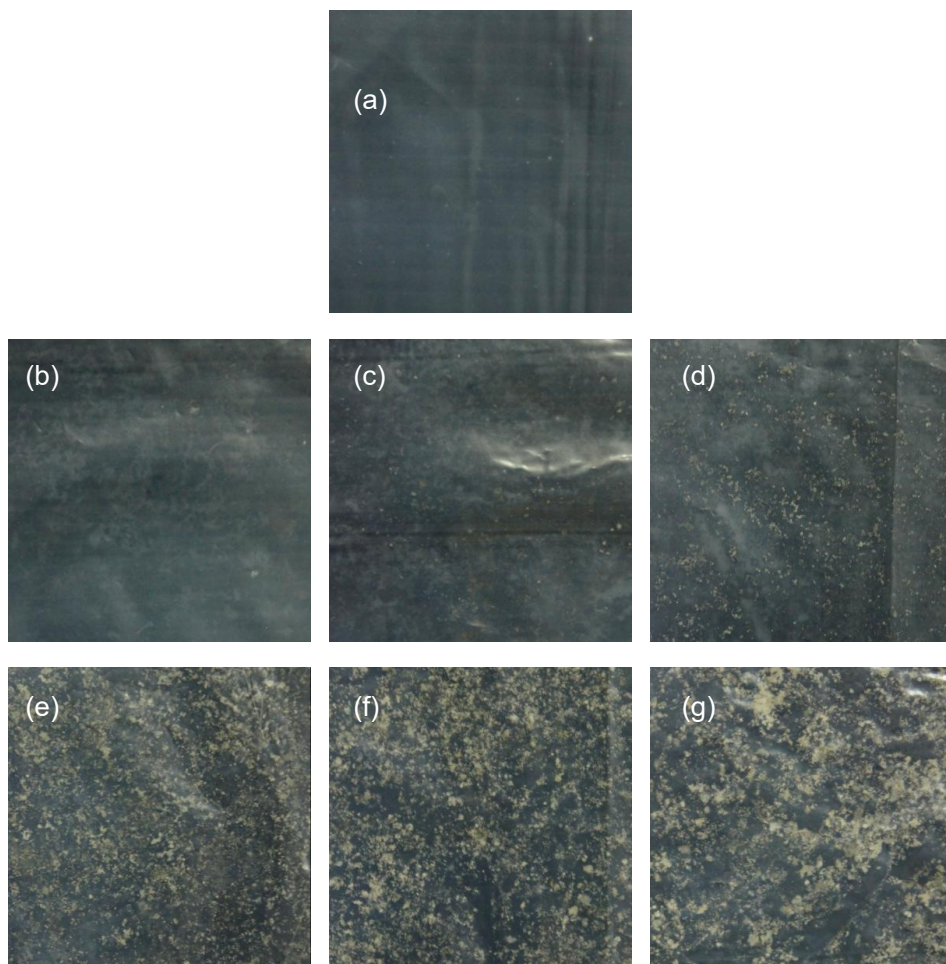
รูปที่ 4.50 (ต่อ)



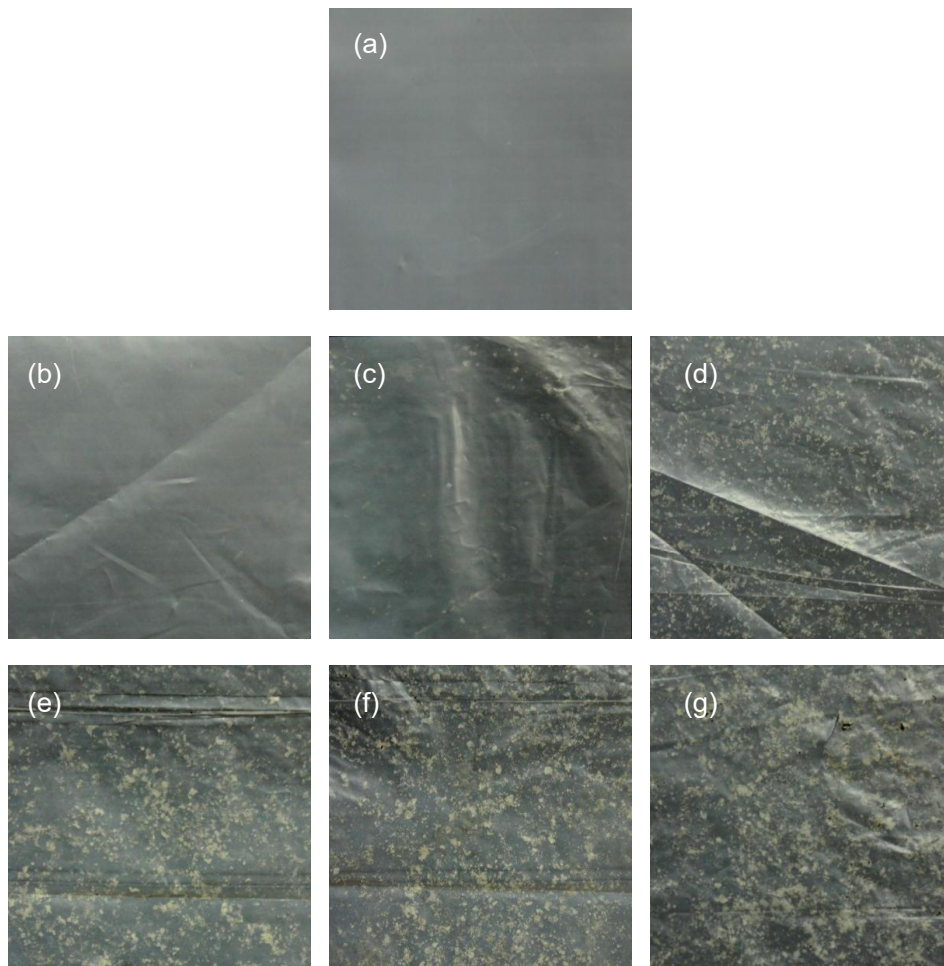
รูปที่ 4.51 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางธรรมชาติ วัลคาไนซ์ 5 wt%: (a) ก่อนฝ้งดิน (b) ฝ้งดิน 30 วัน (c) ฝ้งดิน 60 วัน (d) ฝ้งดิน 90 วัน (e) ฝ้งดิน 120 วัน (f) ฝ้งดิน 150 วันและ (g) ฝ้งดิน 180 วัน



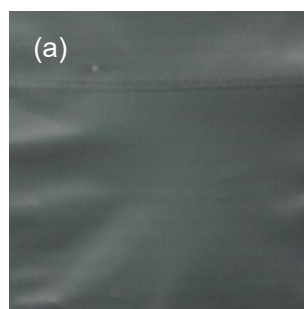
รูปที่ 4.51 (ต่อ)



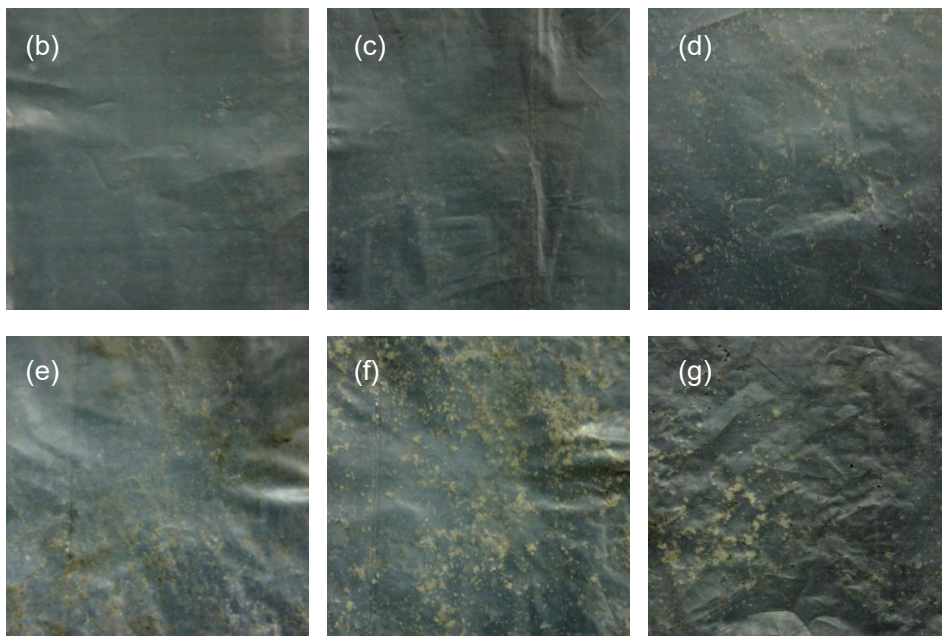
รูปที่ 4.52 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางธรรมชาติ วัลคาไนซ์ 10 wt%: (a) ก่อนฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน



รูปที่ 4.53 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 15 wt%: (a) ก่อนฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน



รูปที่ 4.54 ภาพถ่ายฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 20 wt%: (a) ก่อนฝังดิน (b) ฝังดิน 30 วัน (c) ฝังดิน 60 วัน (d) ฝังดิน 90 วัน (e) ฝังดิน 120 วัน (f) ฝังดิน 150 วันและ (g) ฝังดิน 180 วัน



รูปที่ 4.54 (ต่อ)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 อิทธิพลของเครื่องมือที่ใช้ในการผสม

การผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติความทนต่อแรงดึงมากกว่าและมีเข้ากันได้ดีกว่าการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวและสกรูคู่ ทั้งที่ปริมาณยางธรรมชาติ 20 wt% และ 50 wt% แต่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ จึงเลือกใช้เครื่องผสมแบบปิดในการผสมตลอดโครงการวิจัย

5.2 อิทธิพลของชนิดยาง

5.2.1 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติ

สมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติน้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ สมบัติความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณยางธรรมชาติ 5-10 wt% มีลักษณะเป็นเฟสทรงกลม และมีลักษณะคล้ายแท่งทรงกระบอกเมื่อมีปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น และมีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่องร่วมในกรณีที่มีปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 50 wt% โดยที่ปริมาณยางธรรมชาติ 10 wt% มีขนาดของเฟสเล็กที่สุด ทำให้มีสมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดมากที่สุด และเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ขนาดของเฟสมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีผลทำให้สมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติลดลง

5.2.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25

สมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR25 น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ สมบัติความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณยาง ENR25 ที่เพิ่มขึ้น จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณยาง ENR25 5-10 wt% มีลักษณะเป็นเฟสทรงกลม และมีลักษณะคล้ายแท่งทรงกระบอกเมื่อมีปริมาณ

ยาง ENR25 เพิ่มขึ้น และมีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่องร่วมในกรณีที่มีปริมาณยาง ENR25 เท่ากับ 50 wt% โดยที่ปริมาณยาง ENR25 10 wt% มีขนาดของเฟสดังกล่าวเล็กที่สุด ทำให้มีสมบัติความทนต่อแรงดึงมากที่สุด และเมื่อปริมาณยาง ENR25 เพิ่มขึ้น ขนาดของเฟสดังกล่าวมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีผลทำให้สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR25 ลดลง

5.2.3 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR50

สมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR50 น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ สมบัติความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และสมบัติทางกายภาพมีค่าลดลงตามปริมาณยาง ENR50 ที่เพิ่มขึ้น จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณยาง ENR50 5-30 wt% มีลักษณะเป็นเฟสทรงกลม และมีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่องร่วมในกรณีที่มีปริมาณยาง ENR50 เท่ากับ 50 wt% และขนาดของเฟสดังกล่าวมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อปริมาณยาง ENR50 เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้สมบัติความทนต่อแรงดึงของ PBAT ผสมยาง ENR50 ลดลง

เมื่อเปรียบเทียบยางแต่ละชนิดจะพบว่า PBAT ผสมยาง ENR25 มีสมบัติความทนต่อแรงดึงมากกว่า PBAT ผสมยางธรรมชาติและ PBAT ผสมยาง ENR50 และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่า เฟสของยาง ENR25 มีลักษณะค่อนข้างกลมและมีขนาดเล็กที่สุด จึงทำให้ PBAT ผสมยาง ENR25 มีสมบัติความทนต่อแรงดึงมากที่สุด

5.2.4 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

สมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ และที่ปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ 10 wt% มีสมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดมากที่สุดและมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณยางเพิ่มขึ้น สำหรับสมบัติทางกายภาพมีค่าลดลง เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น

การศึกษาค่าอิทธิพลของการวัลคาไนซ์ในยางธรรมชาติพบว่า การวัลคาไนซ์ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติความทนต่อแรงดึง แต่ทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าลดลง ยกเว้นที่ปริมาณยาง 50 wt% เช่นเดียวกันกับค่าความแข็งและการกระเดื่องตัวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเช่นกัน แต่การวัลคาไนซ์ทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดถาวรของพอลิเมอร์ผสมลดลง

5.2.5 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 วัลคาไนซ์

สมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ และที่ปริมาณยาง ENR25 วัลคาไนซ์ 10 wt% มีสมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดมากที่สุด และมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณยางเพิ่มขึ้น สำหรับสมบัติทางกายภาพมีค่าลดลง เมื่อปริมาณยาง ENR25 วัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น

การศึกษากิจกรรมของการวัลคาไนซ์ในยาง ENR25 พบว่า การวัลคาไนซ์ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติความทนต่อแรงดึง ความแข็งแรงและการกระแตงตัว แต่การวัลคาไนซ์ทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้นและเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง

5.2.6 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR50 วัลคาไนซ์

สมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ และที่ปริมาณยาง ENR50 วัลคาไนซ์ 10 wt% มีสมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดมากที่สุด สำหรับสมบัติทางกายภาพมีค่าลดลง เมื่อปริมาณยาง ENR50 วัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น

การศึกษากิจกรรมของการวัลคาไนซ์ในยาง ENR50 พบว่า การวัลคาไนซ์ทำให้สมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น และทำให้การกระแตงตัวและเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรมีค่าลดลง แต่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสม

เมื่อเปรียบเทียบยางวัลคาไนซ์แต่ละชนิดจะพบว่า PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ มีสมบัติความทนต่อแรงดึงมากที่สุด ขณะที่ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์มีค่ามากที่สุด ความแข็งแรงของ PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน การกระแตงตัวและเปอร์เซ็นต์การยืดถาวรของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์มีค่าน้อยที่สุด

5.3 สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนและหลังฝังดิน

พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับยาง ENR25 และ PBAT กับยาง ENR50 ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ เนื่องจากยางรวมตัวกันในขณะที่ทำการหลอมผสมในเครื่อง SSE ทำให้

ผิวฟิล์มที่เป่าได้ไม่เรียบ แต่ PBAT ผสมยางธรรมชาติสามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ จึงทำการศึกษาสมบัติของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ

5.1.3.1 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT ผสมยางธรรมชาติ

ค่า E , ϵ_b และความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 5 wt% และ 10 wt% มากกว่า PBAT บริสุทธิ์ และลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติมากกว่า 10 wt% แต่ค่า σ_b น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ และลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นทั้งการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและการทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติลดลง หลังจากฝ้งดิน และจากภาพถ่ายแสดงให้เห็นว่า ผิวหน้าของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากฝ้งดิน 2 เดือน และเปลี่ยนแปลงมากขึ้น เมื่อฝ้งดินนานขึ้น

5.1.3.2 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

ค่า E , ϵ_b และความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 5 wt% และ 10 wt% มากกว่า PBAT บริสุทธิ์ และลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มากกว่า 10 wt% แต่ค่า σ_b น้อยกว่า PBAT บริสุทธิ์ และลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นทั้งการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและการทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ลดลง หลังจากฝ้งดิน และจากภาพถ่ายแสดงให้เห็นว่า ผิวหน้าของฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากฝ้งดิน 2 เดือน และเปลี่ยนแปลงมากขึ้น เมื่อฝ้งดินนานขึ้น

การศึกษาอิทธิพลของการวัลคาไนซ์ในยางธรรมชาติพบว่า PBAT ผสมยางวัลคาไนซ์ให้ค่า E ที่สูงกว่า PBAT ผสมยางไม่วัลคาไนซ์เล็กน้อยในทุกสูตรการผสม ในขณะที่ให้ค่า σ_b และ ϵ_b ในทุกสูตรการผสมใกล้เคียงกัน ในส่วนของความต้านทานต่อการฉีกขาดพบว่า PBAT ผสมยางไม่วัลคาไนซ์ให้ค่าที่สูงกว่าหรือใกล้เคียงกันกับ PBAT ที่ผสมยางวัลคาไนซ์ในทุกสูตรการผสม

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดินของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมยางธรรมชาติ ควรจะทำการศึกษาที่ระยะเวลานานกว่านี้ เพื่อหาระยะเวลาในการย่อยสลายที่สมบูรณ์ของฟิล์ม

บรรณานุกรม

- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. การกำหนดมาตรฐานยางและวิธีการมัดยางและการบรรจุหีบห่อ
ยางเพื่อการส่งออก. 2548
- ชนาวดี ลีจากภัย. พลาสติกย่อยสลายได้. บริษัท ไทยสตูดิโอ จำกัด: กรุงเทพฯ. 2549.
พิมพ์ครั้งที่ 1.
- นเรนทร์ อาศัยพานิชย์, การพัฒนาเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ.
มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2550
- ภาสรี เล้ากิจเจริญ. ยางเทอร์โมพลาสติก ศาสตร์และศิลป์ระหว่างยางและพลาสติก วารสาร
พลาสติก 2546. ปีที่ 19 ฉบับที่ 5.
- ภาสรี เล้ากิจเจริญ. เอกสารประกอบการบรรยาย เรื่องยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic
elastomer). 2548.
- วันชาติ ปรีชาตวิวงศ์; วัชระ ผลเจริญ; อาทิตยา ห่วงงาม; วิศนีย์ ยิ่งประเสริฐ. วารสารวิชาการ
วิศวกรรมศาสตร์: การศึกษาคุณสมบัติของยางอ็อกซีไดซ์กับฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์
สำหรับเป็นกาวติดไม้. 2552, ปีที่ 2, ฉบับที่ 2, หน้า 9-16 .
- เสาวนีย์ ก่ออุภูมิกุลรังษี. การผลิตยางธรรมชาติ: ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะ
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. 2547
พิมพ์ครั้งที่ 4.
- อรอุมา สันตวิธี. ผลของโครงสร้างโมเลกุลและองค์ประกอบของความเป็นกิ่งของพอลิเอทิลีนที่มีต่อ
กลไกการสลายตัวของพอลิไวนิลคลอไรด์ในพอลิเมอร์ผสมของพอลิไวนิลคลอไรด์และ
พอลิเอทิลีน. มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2548, หน้า 40-44.
- อาทิตยา โยธารักษ์. ผลของสภาวะที่ใช้ในกระบวนการอัดรีดที่มีต่อโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงของ
พอลิไวนิลคลอไรด์ในพอลิเมอร์ผสมแบบหลอม. มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2549, หน้า
26-30.

- Abraham, T.; McMahan, C. *Rubber Compounding Chemistry and Applications: Thermoplastic Elastomers: Fundamentals and Applications*. Taylor & Francis. 2004.
- Andricic, B.; Kovacic, T.; Klaric, I. Miscibility and Thermooxidative Degradation of Poly(vinyl chloride)/Biodegradable Aliphatic-Aromatic Copolyester Blends. *J. Appl. Polym. Sci.* **2006**, 100, 2158-2163.
- Arnold, R.A., and Rader, C.P. *Handbook of plastics, elastomer and composites*. 2nd ed.; Mc Graw-Hill: New York, 2002; c7, pp 7.1-7.47.
- Averous, L.; Digabel, F. L. Properties of biocomposites based on lignocellulosic fillers. *Carbohydr. Polym.* **2006**, 66, 480-493.
- Averous, L.; Fringant, C. Association Between Plasticized Starch and Polyesters: Processing and Performances of Injected Biodegradable Systems. *Polym. Eng. Sci.* **2001**, 41(5), 727-734.
- Brandelero, R. P.; Yamashita, F.; Grossmann, M. E. The effect of surfactant Tween 80 on the hydrophilicity, water vapor permeation, and the mechanical properties of cassava starch and poly(butylenes adipate-co-terephthalate) (PBAT) blend films. *Carbohydr. Polym.* **2010**, 82, 1102-1109.
- Chen, J. H.; Chen, C. C.; Yang, M. C. Characterization of Nanocomposites of Poly(butylene adipate-co-terephthalate) blending with Organoclay. *J. Polym. Res.* **2011**, 18, 2151-2159.
- Chivrac, F.; Kadlecova, Z.; Pollet, E.; Averous, L. Aromatic Copolyester-based Nano-biocomposites: Elaboration, Structural Characterization and Properties. *J. Polym. Environ.* **2006**, 14, 393-401.

- Coltelli, M. B.; Maggiore, I. D.; Bertoldo, M.; Sionori, F.; Bronco, S.; Ciardelli, F. Poly(lactic acid) Properties as a Consequence of Poly(butylenes adipate-co-terephthalate) Blending and Acetyl Tributyl Citrate Plasticization. *J. Appl. Polym. Sci.* **2008**, 110, 1250-1262.
- Correlo, V. M.; Boesel, L. F.; Bhattacharya, M.; Mano, J. F.; Neves, N. M.; Reis, R. L. Properties of melt processed chitosan and aliphatic polyester blends. *Mater. Sci. Eng. A* **2005**, 403(1-2), 57-68.
- Costa, F. R.; Dutta, N. K.; Choudhury, N. R.; Bhowmick A. K. *Elastomers Research: Thermoplastic Elastomers*. Taylor & Francis Group. 2008
- El-Sabbagh, S. H.; Tawfik, M. E.; Helaly, F. M. Preparation and Characterization of Blends Containing Natural and Some Synthetic Rubber with Synthesized Aromatic Polyester. *J. Appl. Polym. Sci.* **2008**, 109, 2823-2835.
- Farsetti, S.; Cioni, B.; Lazzeri, A. Physico-Mechanical Properties of Biodegradable Rubber Toughened polymers. *Macromol. Symp.* **2011**, 301, 82-89.
- George, S.; Joseph, R.; Thomas, S. Blends of isotectic polypropylene and nitrile rubber: morphology, mechanical properties and compatibilization. *polym.* **1995**, 36(23), 4405-4416.
- George, S.; Prasannakumari, L.; Koshy, P.; Varughese, K. T.; Thomas, S. Tearing behavior of blends of isotactic polypropylene and nitrile rubber: influence of blend ratio, morphology and compatibilizer loading. *Mater. Lett.* **1996**, 26, 51-58.
- Gu, S. Y.; Zhang, K.; Ren, J.; Zhan, H. Melt rheology of polylactide/poly(butylenes adipate-co-terephthalate) blends. *Carbohydr. polym.* **2008**, 74, 79-85.

Harper, C.H. *Modern plastics handbook*. 2nd ed; Mc Graw Hill: New York, 2000; c3, pp 3.1-3.50.

Holden, G. *Understanding thermoplastic elastomer*. Hanser publishers. 2000

Ibrahim, N. A.; Rahim, N. M.; Yunus, W. Z.; Sharif, J. A study of polyvinyl chloride/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends. *J. Polym. Res.* **2011**, 18, 891-896

Iwakura, Y.; Li, Y.; Nakayama, K.; Shimizu, H. Strengthening of Poly(butylenes adipate-co-terephthalate) by Melt Blending with a Liquid Crystalline Polymer. *J. Appl. Polym. Sci.* **2008**, 109, 333-339.

Javadi, A.; Kramschuster, A. J.; Pilla, S.; Lee, J.; Gong, S.; Turng, L. S. Processing and Characterization of Microcellular PHBV/PBAT Blends. *Polym. Eng. Sci.* **2010**, 50, 1440-1448.

Jiang, L.; Liu, B.; Zhang, J. Properties of Poly(lactic acid)/Poly(butylene adipate-co-terephthalate)/Nanoparticle Ternary Composites. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2009**, 48(16), 7594-7602.

John, B.; Varughese, K.T.; Oommen, Z.; Petra., P.; Thomas., S. Dynamic mechanical behavior of high-density polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer blend: the effects of the blend ratio reactive compatibilization, and dynamic vulcanization. *J. Appl. Polym. Sci.* **2003**, 87, 2083-2099.

Kanzawa, T.; Tokumitsu, K. Mechanical Properties and Morphological Changes of Poly(lactic acid)/Polycarbonate/Poly(butylenes adipate-co-terephthalate) Blend Through Reactive Processing. *J. Appl. Polym. Sci.* **2011**, 121, 2908-2918.

- Kijchavengkul, T.; Auras, R.; Rubino, M.; Alvarado, E.; Montero, J. C.; Rosales, J. M. Atmospheric and soil degradation of aliphatic aromatic polyester films. *Polym. Degrad. Stabil.* **2010**, 95(2), 99-107.
- Kijchavengkul, T.; Biodegradation and hydrolysis rate of aliphatic aromatic polyester. *Polym. Degrad. Stabil.* **2010**, 95, 2641-2647.
- Klingensmith, W.; Rodgers, B. *Rubber Compounding Chemistry and Applications: Natural Rubber and Recycled Materials*; Marcel Dekker, Inc.: New York, 2004.
- Ko, S. W.; Gupta, R. K.; Bhattacharya, S. N.; Choi, H. J. Rheology and Physical Characteristics of Synthetic Biodegradable Aliphatic Polymer Blends Dispersed with MWNTs. *Macromol. Mater. Eng.* **2010**, 295, 320-328.
- Kumar, C. R.; George, K. E.; Thomas, S. Morphology and Mechanical Properties of Thermoplastic Elastomers from Nylon-Nitrile Rubber Blends. *J. Appl. Polym. Sci.* **1996**, 61, 2383-2396.
- Kumar, M.; Mohanty, S.; Nayak, S.; Parvaiz, M. R. Effect of glycidyl methacrylate (GMA) on the thermal, mechanical and morphological property of biodegradable PLA/PBAT blend and its nanocomposites. *Bioresource Technol.* **2010**, 101, 8406-8415.
- Lee, S.; Lee, Y.; Lee, J. W. Effect of Ultrasound on the Properties of Biodegradable Polymer Blends of Poly(lactic acid) with Poly(butylene adipate-co-terephthalate), *Macromol. Res.* **2007**, 15(1), 44-50.
- Li, K.; Peng, J.; Turng, L. S.; Huang, H. X. Dynamic Rheological Behavior and Morphology of Polylactide/Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blends with Various Composition Ratios. *Adv. Polym. Tech.* **2011**, 30(2), 150-157.

- Ludvik, C. N.; Glenn, G. M.; Klamezynski, A. P.; Wood, D. F. Cellulose Fiber/Bentonite Clay/Biodegradable Thermoplastic Composites. *J. Polym. Environ.* **2007**, *15*, 251-257.
- Madera-Santana, T. J.; Misra, M.; Drzal, L. T.; Robledo, D.; Freile-Pelegri, Y. Preparation and Characterization of Biodegradable Agar/Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Composites. *Polym. Eng. Sci.* **2009**, *49*, 1117-1126.
- Mahapram, S.; Poompradub, S. Preparation of natural rubber (NR) latex/low density polyethylene (LDPE) blown film and its properties. *Polym. Test* **2011**, *30*, 716-725.
- Mani, R.; Bhattacharya, M. Properties of injection moulded blends of starch and modified biodegradable polyesters. *Eur. Polym. J.* **2001**, *37*, 515-526.
- Mohanty, A. K.; Misra, M.; Drzal, L. T.; Selke, S. E.; Harte, B. R.; Hinrichsen, G. *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*; Taylor & Francis, 2005
- Mohanty, S.; Nayak, S. K.; Aromatic-Aliphatic Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Bionanocomposite: Influence of Organic Modification on Structure and Properties. *Polym. Compos.* **2010**, *31*, 1194-1204.
- Mohanty, S.; Nayak, S. K. Starch based biodegradable PBAT nanocomposites: Effect of starch modification on mechanical, thermal, morphological and biodegradability behavior. *Int. J. Plast. Technol.* **2009**, *13*(2), 163-185.
- Muller, R. J. *Biopolymer: Biodegradability of Polymers: Regulations and Methods for Testing*; Wiley-VCH: Weinheim, 2003; 10, pp 365-374.
- Olivato, J. B.; Grossmann, M. V. E.; Yamashita, F.; Nobrega, M. M.; Scapin, M. R. S.; Eiras, D.; Pessan, L. A. Compatibilisation of starch/poly(butylene adipate-co-

terephthalate) blends in blown films. *Int. J. FoodSci. Tech.* **2011**, 46, 1934-1939.

Oyama, H. T.; Tanaka, Y.; Hirai, S.; Shida, S.; Kadosaka, A. Water-Disintegrative and Biodegradable Blends Containing Poly(L-lactic acid) and Poly(butylenes adipate-co-terephthalate). *J. Polym Sci Part B: Polym. Phys.* **2011**, 49, 342-354.

Raquez, J. M.; Nabar, Y.; Narayan, R.; Dubois, P. In Situ Compatibilization of Maleated Thermoplastic Starch/Polyester Melt-Blends by Reactive Extrusion. *Polym. Eng. Sci.* **2008**, 48, 1747-1754.

Raquez, J. M.; Nabar, Y.; Narayan, R.; Dubois, P. Novel High-Performance Talc/Poly[(butylenes adipate)-co-terephthalate] Hybrid Materials. *Macromol. Mater. Eng.* **2008**, 293, 310-320.

Raquez, J. M.; Nabar, Y.; Narayan, R.; Dubois, P. Preparation and Characterization of Maleated Thermoplastic Starch-Based Nanocomposites. *J. Appl. Polym. Sci.* **2011**, 122(1), 639-647.

Ren, J.; Fu, H.; Ren, T.; Yuan, W. Preparation, characterization and properties of binary and ternary blends with thermoplastic starch, poly(lactic acid) and poly(butylenes adipate-co-terephthalate). *Carbohydr. Polym.* **2009**, 77, 576-582.

Shah, A. A.; Hasan, F.; Hameed, A.; Ahmed, S. Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnol. Adv.* **2008**, 26, 246-265.

Shahlari, M.; Lee, S. *Proceedings of the 2008 AIChE Annual Meeting: Biodegradable polymer/clay nanocomposites based on poly(butylene adipate-co-terephthalate) and poly(lactic acid)*, 2008, 655.

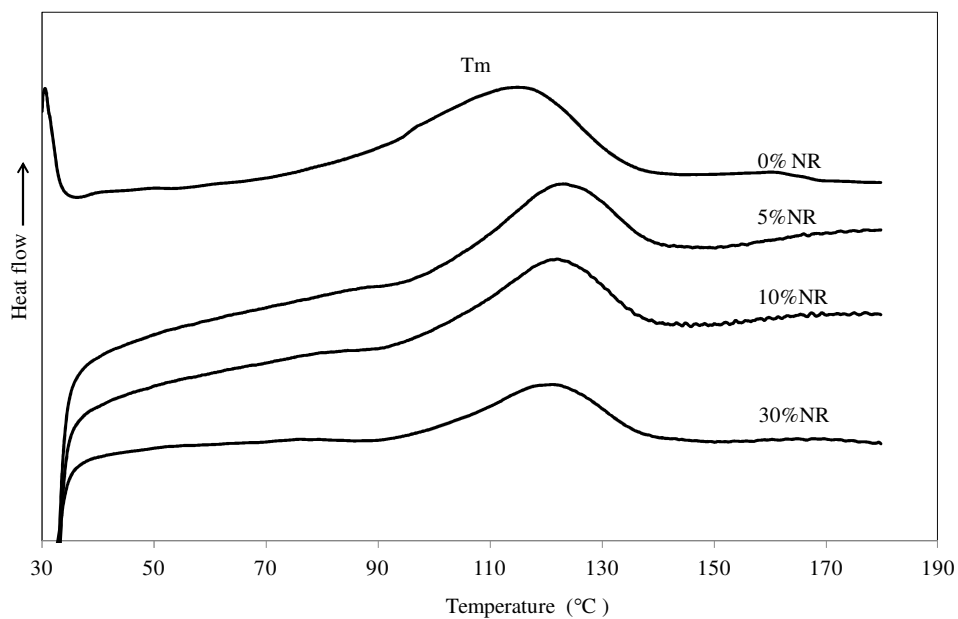
- Shi, B.; Shlepr, M.; Palfery, D. Effect of Blend Composition and Structure on Biodegradation of Starch/Ecoflex-Filled Polyethylene Films. *J. Appl. Polym. Sci.* **2011**, *120*, 1808-1816.
- Shi, X. Q.; Ito, H.; Kikutani, T. Characterization on mixed-crystal structure and properties of poly(butylenes adipate-co-terephthalate) biodegradable fibers. *polymer* **2005**, *46*, 11442-11450.
- Signori, F.; Coltelli, M. B.; Bronco, S. Thermal degradation of poly(lactic acid) (PLA) and poly(butylenes adipate-co-terephthalate) (PBAT) and their blends upon melt processing. *Polym. Degrad. Stabil.* **2009**, *94*, 74-82.
- Someya, Y.; Sugahara, Y.; Shibata M. Nanocomposites Based on Poly(butylenes adipate-co-terephthalate) and Montmorillonite. *J. Appl. Polym. Sci.* **2005**, *95*, 386-392.
- Srithep, Y.; Javadi, A.; Pilla, S.; Turng, L. S.; Gong, S.; Clemons, C.; Peng, J. Processing and Characterization of Recycled poly(ethylene terephthalate) Blends With Chain Extenders, Thermoplastic Elastomer, and/or Poly(butylenes adipate-co-terephthalate). *Polym. Eng. Sci.* **2011**, *51*, 1023-1032.
- Sykacek, E.; Hrabalova, M.; Frech, H.; Mundigler, N. Extrusion of five biopolymers reinforced with increasing wood flour concentration on a production machine, injection moulding and mechanical performance. *Compos. Part A* **2009**, *40*, 1272-1282.
- Tokiwa, Y.; Calabria, B. P.; Ugwu, C. U.; Aiba, S. Biodegradability of Plastics. *Int. J. Mol. Sci.* **2009**, *10*, 3722-3742.
- Witt, U.; Einig, T.; Yamamoto, M.; Kleeberg, I.; Deckwer, W. D.; Muller R. J. Biodegradation of aliphatic-aromatic copolyesters: evaluation of the final

- biodegradability and ecotoxicological impact of degradation intermediates. *Chemosph.* **2001**, 44, 289-299.
- Wu, C. H. Characterization of cellulose acetate-reinforced aliphatic-aromatic copolyester composites. *Carbohydr. Polym.* **2012**, 87, 1249-1256.
- Wu, C. S. Process, Characterization and Biodegradability of Aliphatic Aromatic Polyester/Sisal Fiber Composites. *J. Polym. Environ.* **2011**, 19, 706-713.
- Xiao, H.; Lu, W.; Yeh, J. T. Crystallization Behavior of Fully Biodegradable Poly(Lactic Acid)/Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) Blends. *J. Appl. Polym. Sci.* **2009**, 112, 3754-3763.
- Yamamoto, M.; Witt, U.; Skupin, G.; Beimborn, D.; Muller, R. J. *Biodegradable Aliphatic-Aromatic Polyester: "Ecoflex®"*; Wiley-VCH: Weinheim, 2005; 299-305
- Yang, F.; Qiu, Z. Preparation, Crystallization, and Properties of biodegradable Poly(butylenes adipate-co-terephthalate)/Organomodified Montmorillonite Nanocomposites. *J. Appl. Polym. Sci.* **2011**, 119, 1426-1434.
- Yeh, J. T.; Tsou, C. H.; Huang, C. Y.; Chen, K. N.; Wu, C. S.; Chai, W. L. Compatible and crystallization properties of poly(lactic acid)/poly(butylenes adipate-co-terephthalate) blends. *J. Appl. Polym. Sci.* **2010**, 116, 680-687.
- Zhang, N.; Wang, Q.; Ren, J.; Wang, L. Preparation and properties of biodegradable poly(lactic acid)/poly(butylenes adipate-co-terephthalate) blend with glycidyl methacrylate as reactive processing agent. *J. Mater. Sci.* **2009**, 44, 250-256.
- Zhao, P.; Liu, W.; Wu, Q.; Ren, J. Preparation, Mechanical, and Thermal Properties of Biodegradable Polyesters/Poly(Lactic Acid) Blends. *J. Nanomat.* **2010**, 2010, 1-8

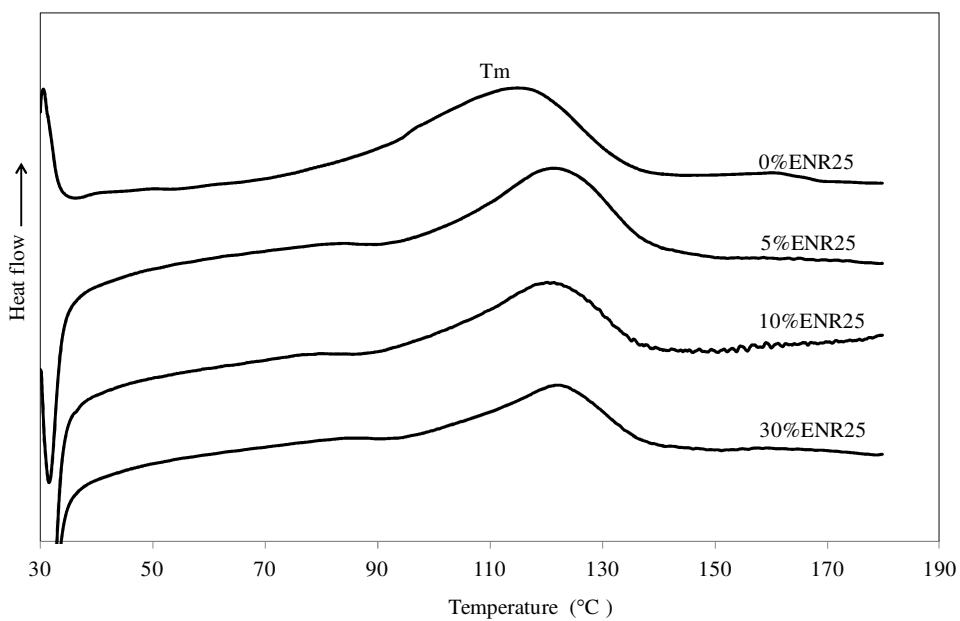
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

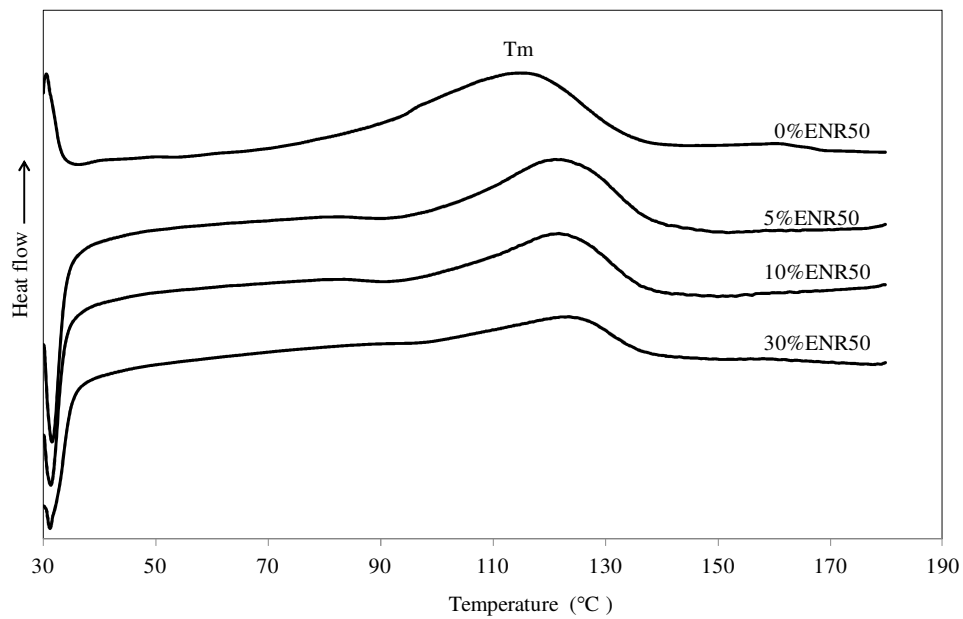
DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม



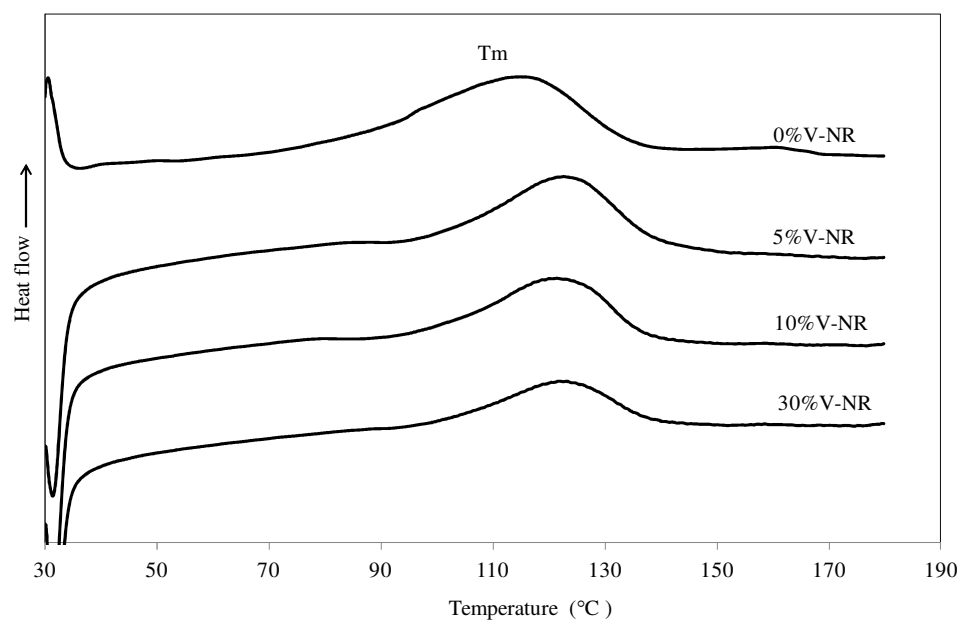
รูปที่ ก.1 DSC thermogram ของ PBAT ผสมยางธรรมชาติที่มีปริมาณยาง 0 – 30 wt%



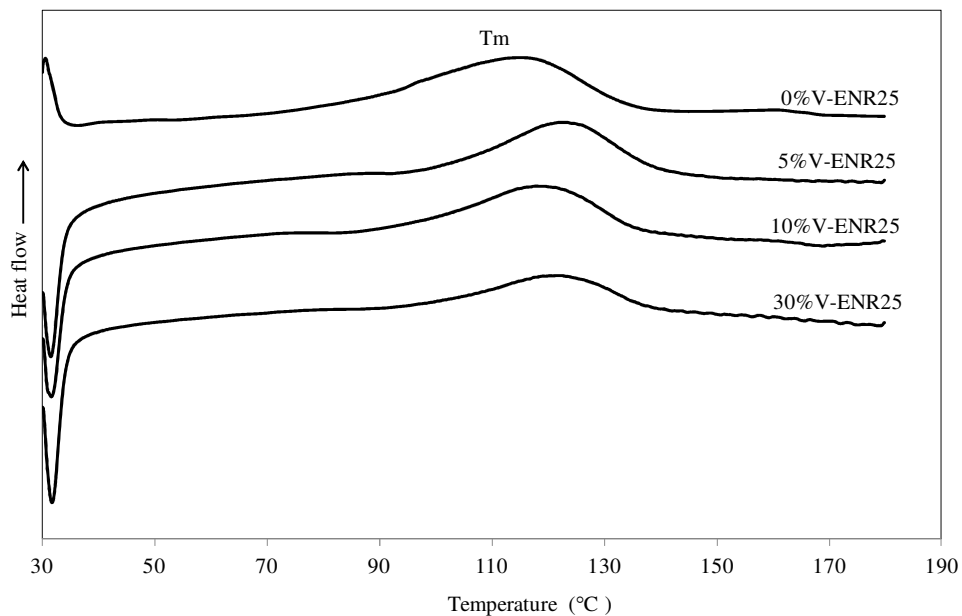
รูปที่ ก.2 DSC thermogram ของ PBAT ผสมยาง ENR25 ที่มีปริมาณยาง 0 – 30 wt%



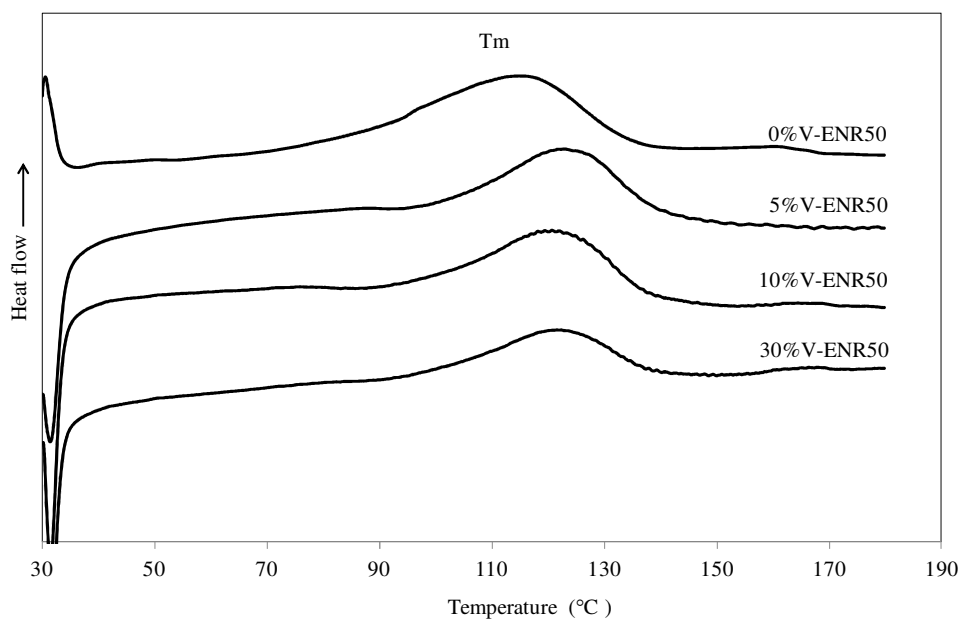
รูปที่ ก.3 DSC thermogram ของ PBAT ผสมยาง ENR50 ที่มีปริมาณยาง 0 – 30 wt%



รูปที่ ก.4 DSC thermogram ของ PBAT ผสมยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 30 wt%



รูปที่ ก.5 DSC thermogram ของ PBAT ผสมยาง ENR25 วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยาง 0 – 30 wt%



รูปที่ ก.6 DSC thermogram ของ PBAT ผสมยาง ENR50 วัลคาไนซ์ ที่มีปริมาณยาง 0 – 30 wt%

ภาคผนวก ข

เอกสารการเผยแพร่ผลงาน

Effect of NR and ENR on physical properties of poly(butylenes adipate-co-terephthalate)

Nuda Pisutthian¹, Pasaree Laokijcharoen² and Varaporn Tanrattanakul^{1*}

¹Bioplastic Research Unit, Department of Materials Science and Technology
Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkla 90112, Thailand

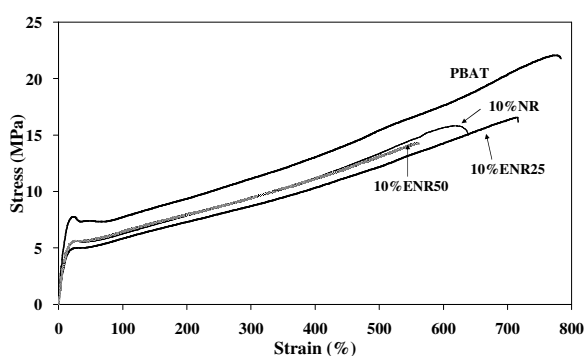
Phone 0-7428-8362, Fax 0-7444-6725, E-Mail: varaporn.t@psu.ac.th

²National Metal and Materials Technology Center, Bangkok 10400

Phone 0-2564-6500, Fax 0-2564-6446, E-Mail: pasareel@mtec.or.th

Abstract

Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) is a new biodegradable polyester. PBAT is classified as the elastomer due to high ductility. It is interesting to blend PBAT with natural rubber (NR) or epoxidized natural rubber in order to reduce cost of the products because of high price of PBAT. PBAT was blended with NR or ENR. The rubber content was 10-30 wt%. The blends were prepared by using an internal mixer and compression molding machine. ENR25 and ENR50 are the epoxidized natural rubber containing 25 and 50 mol% epoxidation, respectively. NR and ENR did not change tensile behavior of PBAT as shown in Fig. 1. It was expected that rubber decreased tensile properties and tear strength of PBAT because of non-vulcanization in the rubber phase (Table 1). Hardness and



resilience of the blends were lower than those of PBAT. ENR50 provided highest modulus and hardness due to its high degree of epoxidation. At 10% of rubber, ENR25 seemed to be the best one based on tensile properties and NR yielded highest tear strength. The modulus and the strength of the blends dramatically dropped after increasing

rubber content (Table 2). PBAT performed plastic deformation after tensile testing whereas the blends showed lesser plastic deformation. Due to lower price of rubber compared to PBAT, the blends containing 10% rubber could be used and replaced PBAT.

Fig.1 Stress-strain curves of PBAT and the blends.

Table 1 Physical properties of the blends containing 10 wt% of rubber

Rubber	E (MPa)	σ_y (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	Tear strength (N/mm)	Hardness Shore A	Resilience (%)
-	60.65±1.71	7.79±0.10	21.73±0.47	778±8	104±1	91±1	52±1
NR	42.96±2.46	5.41±0.15	14.95±1.17	609±66	83±2	87±1	34±0
ENR25	40.88±4.55	4.73±0.07	16.07±1.03	703±52	80±1	85±1	38±1
ENR50	48.36±1.78	5.07±0.11	13.38±1.78	532±94	78±2	88±0	38±0

Table 2 Physical properties of the blends containing 30 wt% of rubber

Rubber	E (MPa)	σ_y (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	Tear strength (N/mm)	Hardness Shore A	Resilience (%)
-	60.65±1.71	7.79±0.10	21.73±0.47	778±8	104±1	91±1	52±1
NR	17.03±1.62	3.56±0.11	7.78±0.63	527±60	52±2	79±1	32±1
ENR25	18.06±1.72	3.31±0.13	5.29±0.54	282±45	51±1	83±1	54±2
ENR50	24.55±1.85	3.85±0.09	6.83±0.78	384±72	54±2	85±1	46±0

Keywords : Poly(butylene adipate-co-terephthalate), Natural rubber, Epoxidized natural rubber, Biodegradable polymer, Renewable resources

Tensile Properties of Poly(butylene adipate-co-terephthalate) blended with Natural Rubber

Nuda Pisutthian¹, Pasaree Laokijcharoen² and **Varaporn Tanrattanakul**^{1*}

¹Bioplastic Research Unit, Department of Materials Science and Technology
Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkla 90112, Thailand
Phone 0-7428-8362, Fax 0-7444-6725, E-Mail: varaporn.t@psu.ac.th

²National Metal and Materials Technology Center, 114 Thailand Science Park
Paholyothin Road, Pathumthani, 12120, Thailand
Phone 0-2564-6500, Fax 0-2564-6446, E-Mail: pasareel@mtec.or.th

Abstract

Poly(butylene adipate-co-terephthalate) was blended with natural rubber by using different processing methods: a single screw extruder, a twin screw extruder and an internal mixer. The extrusion was performed 1-3 times. The residence time of all blends mixed in the extruders was shorter than those prepared in the internal mixer. It was found that blending by the internal mixer showed the highest tensile properties and the blends obtained from the twin screw extrusion was better than one from the single screw extrusion. The effect of number of extrusion and natural rubber content on tensile properties of the blends was described as well.

1. Introduction

Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) is a new family of biodegradable polyester. It has been commercially produced in the 2000s. Study of PBAT-based polymer blends includes poly(lactic acid)/PBAT blends [1-2], starch/PBAT blends [3], soy protein/PBAT blends [4] and poly(butylene terephthalate)/PBAT blends [5]. Due to high flexibility and ductility of PBAT, it is interesting to blend PBAT with natural rubber (NR) in order to make a new type of elastomer blend. The aim of this study is to investigate the effect of processing methods on tensile properties of PBAT/NR blends.

2. Experimental

2.1 Materials

PBAT was Ecoflex[®] FBX7011. STR5 CV60 NR was employed and produced by Jana Concentrated Latex Co.,

Songkla, Thailand. Antioxidant, 1 phr Wingstay[®] L, was added into NR.

2.2 Polymer blends preparation

Three types of processing methods were applied for blend preparation: single screw extruder (SSE), twin screw extruder (TSE) and internal mixer. Temperature of polymer blending and compression molding was 120°C. Samples prepared from SSE and TSE were extruded 1-3 times. The first extrusion speed was 100 rpm and the second and the third speeds were 120 rpm. The rotor speed in the internal mixer was 100 rpm. Polymer blends composed of 10-50 wt% NR. Examples of sample designation are listed in Table 1.

2.3 Testing Procedure

Tensile properties were investigated according to ASTM D412C. Testing speed was 500 mm/min.

3. Results and discussion

Effect of processing methods on tensile properties of PBAT/NR blends is illustrated in Figure 1 and Table 2. Stress-strain behavior of the blends did not change compared to PBAT, except the S1-20 which was very brittle. Addition of NR decreased tensile properties of PBAT for all processing methods. Tensile properties of the blends increased with increasing number of extrusion of SSE. In contrast, twice extrusion of TSE showed the relatively good tensile properties. Among three processing methods, the internal mixer provided the best tensile properties. This may be due to the time of mixing in SSE and TSE was too short, causing high phase segregation which supported by SEM analysis (not

shown here). Effect of NR content on tensile properties is revealed in Figure 2 and Table 3. Tensile properties decreased with increasing NR content. Undoubtedly, unvulcanized NR yielded lower tensile properties than PBAT, resulting to low tensile properties of the blends. Effect of vulcanized NR will be determined in the future and PBAT blended with epoxidized natural rubber will be investigated as well.

Table 1 Examples of sample designation

Code	NR (wt%)	Processing	No. of extrusion
S1-20	20	SSE	1
S2-20	20	SSE	2
T2-20	20	TSE	2
T3-20	20	TSE	3
I-20	20	Internal mixer	-
I-50	50	Internal mixer	-

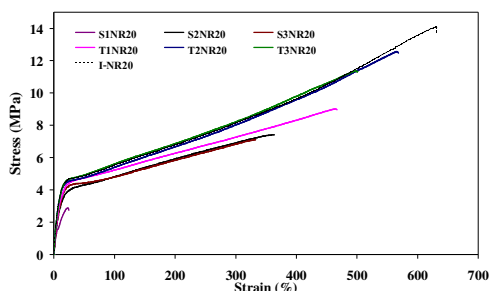


Figure 1 Stress-strain curves of PBAT/NR blends containing 20 wt% NR prepared by different equipment.

Table 2 Tensile properties of PBAT/NR blends containing 20 wt% NR

Code	σ_y (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
PBAT	7.79 ± 0.10	21.73 ± 0.47	778 ± 8
S1-20	2.84 ± 1.35	3.27 ± 1.31	34 ± 19
S2-20	4.09 ± 0.08	8.50 ± 1.01	445 ± 78
S3-20	4.39 ± 0.13	8.76 ± 1.15	497 ± 72
T1-20	4.52 ± 0.06	8.53 ± 0.82	432 ± 76
T2-20	4.49 ± 0.11	12.28 ± 0.77	540 ± 24
T3-20	4.42 ± 0.09	11.39 ± 0.62	511 ± 29
I-20	4.48 ± 0.11	13.94 ± 1.24	642 ± 54

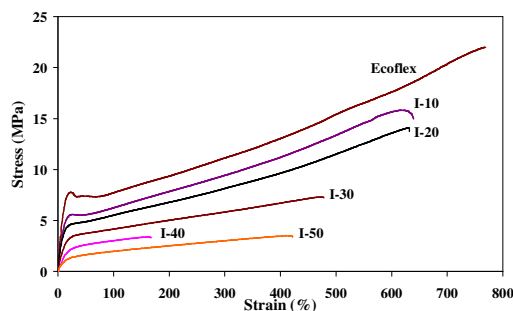


Figure 2 Stress-strain curves of PBAT/NR blends prepared by using the internal mixer.

Table 3 Tensile properties of PBAT/NR blends prepared by using the internal mixer

NR (wt%)	σ_y (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
0	7.79 ± 0.10	21.73 ± 0.47	779 ± 8
10	5.41 ± 0.15	14.95 ± 1.17	609 ± 66
20	4.48 ± 0.11	13.94 ± 1.24	642 ± 54
30	3.56 ± 0.11	7.78 ± 0.63	527 ± 60
40	2.51 ± 0.13	3.63 ± 0.58	173 ± 48
50	1.49 ± 0.14	3.21 ± 0.17	375 ± 41

1. Conclusion

The internal mixer and TSE can be used for blending PBAT and NR and it is necessary to extrude twice in the case of TWSE.

Reference

- [1] Gu, S.; Zhang, K.; Ren, J.; Zhan, H. Carbo Polym 2008, 74, 79.
- [2] Signori, F.; Coltelli, M.; Bronco, S. Polym Degrad Stab 2009, 94, 74.
- [3] Raquez, J.; Nabar, Y.; Narayan, R.; Dubois, P. Polym Eng Sci 2008, 48, 1747.
- [4] Chen, F.; Zhang, J. Polymer 2009, 50, 3770.
- [5] Shi, X.; Ito, H.; Kikutani, T. Polymer 2006, 47, 611.

Acknowledgement

This project is financially supported by Prince of Songkla University, the Graduate School, and National Science and Technology Development Agency.

MECHANICAL PROPERTIES OF PBAT/NR TUBULAR BLOWN FILM

N. Pisutthian¹, P. Laokijcharoen², V. Tanrattanakul¹

¹Bioplastic Research Unit, Department of Materials Science and Technology,
Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkla, 90112, Thailand

²National Metal and Materials Technology Center, Pathumthani 12120, Thailand
varaporn.t@psu.ac.th

Introduction

There was an attempt to prepare a polymer blend between poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and natural rubber (NR) [1,2]. Due to high flexibility and ductility of PBAT, it is interesting to blend PBAT and NR in order to make a new type of elastomer blend which reduces cost of the product. It is found that mechanical properties of the PBAT/NR blends decrease with increasing NR content. Both studies [1,2] focused on a plastic sheet prepared from the blends. Because the main application of PBAT is used as a film product; therefore, the present study investigated how NR affected film properties of PBAT in view of tensile properties and tear resistance.

Experimental

Ecoflex[®] FBX7011 and STR5 CV60 NR were blended in an internal mixer (Brabender[®] Mixer 350E) at 120°C. Tubular blown film was carried out in the Brabender[®] SSE19/25D. The screw and die temperatures were 120-145°C and 140°C, respectively. The screw speed was 100 rpm. The blowing pressure was 5 psi and the take off speed was 1 m/min. The blends contained 5, 10 and 15 wt% of NR. Tensile properties testing (ASTM D882) and tear resistance testing (ASTM D624) were done in both directions of the films (machine direction, MD, and transverse direction, TD) at the testing speed of 500 mm/min. Eight specimens were tested for every sample.

Results and Discussion

The blown film thickness was ~ 0.06 mm, in the range of a commercial PE blown film. Typically, PBAT film shows similar tensile behavior to LDPE film. Stress-strain curves of PBAT and the blends containing non-vulcanized NR and vulcanized NR show in Fig. 1. Tensile properties of PBAT and the blends in both directions of film processing (MD and TD) are tabulated in Tables 1-4. It is difficult to compare mechanical properties of polymeric films which produced by different processing conditions and testing by different standard test methods. For example, BASF reported that tensile strength and elongation at break of the Ecoflex[®] was 32-36 MPa and 580-820%, respectively, whereas Kijchavengkul *et al.* [3] showed both properties of PBAT at 17.9 MPa and 492% in the MD. The tensile properties of PBAT in the present study were in between both reports. The addition of 5-10% NR increased modulus, elongation at break and tear strength and, then, the properties decreased when added 15% NR (Table 1). The addition of NR slightly lowered stress at yield and tensile strength of PBAT. The same trend appeared in the properties in the TD (Table 2). The results indicated the advantages of NR in the blends. Sulfur vulcanization in NR was applied in order to compare with the non-vulcanized NR. Without vulcanization, NR is a soft polymer that can be easily deformed and flowable. The elastomeric properties of NR become visible after vulcanization. Modulus and stress at yield of the blends increased after

vulcanization while tensile strength and elongation at break slightly decreased (Table 1 and 3).

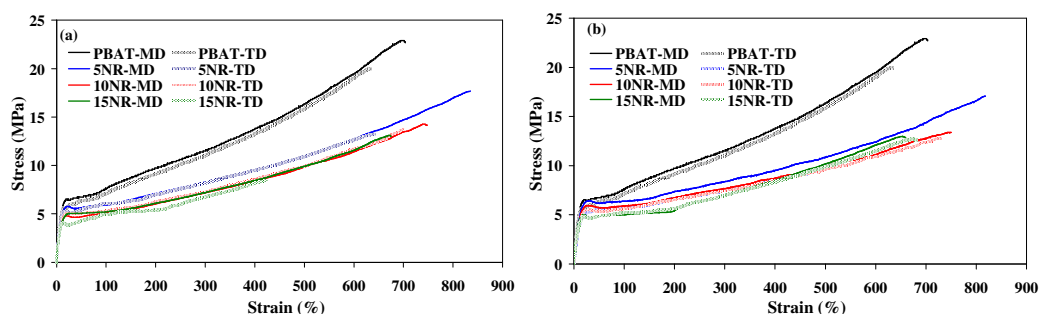


Figure1 Stress-strain curves of PBAT and the blends: (a) non-vulcanized NR; (b) vulcanized NR.

The increase in modulus after vulcanization was also observed in the TD (Table 4) and other properties showed slight changes. Unexpectedly, the vulcanization caused a reduction in tear strength. Blend characterization and biodegradation in soil of all blends will be studied in future work. Based on ease of tubular blown film processing in the present study, it was found that NR acted as a processing aid during blowing. Film blocking occurred in the PBAT film whereas the film from PBAT/NR blends showed no blocking and easier processing.

Table 1 Mechanical properties in MD of the blends containing non-vulcanized NR

NR content (%)	Film thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	Tear strength (N/mm)
0	0.056 ± 0.001	43 ± 2	5.8 ± 0.5	21.9 ± 1.5	693 ± 42	81 ± 5
5	0.056 ± 0.005	54 ± 2	5.8 ± 0.3	17.7 ± 1.1	834 ± 35	93 ± 1
10	0.053 ± 0.003	53 ± 1	4.6 ± 0.2	14.2 ± 1.0	764 ± 37	85 ± 2
15	0.063 ± 0.003	33 ± 1	4.3 ± 0.5	11.9 ± 1.5	674 ± 55	59 ± 4

Table 2 Mechanical properties in TD of the blends containing non-vulcanized NR

NR content (%)	Film thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	Tear strength (N/mm)
0	0.056 ± 0.001	39 ± 1	5.3 ± 0.4	19.4 ± 1.5	635 ± 53	69 ± 6
5	0.056 ± 0.005	53 ± 1	5.3 ± 0.4	13.9 ± 0.8	629 ± 33	94 ± 3
10	0.053 ± 0.003	49 ± 4	5.0 ± 0.3	13.3 ± 1.2	686 ± 47	77 ± 2
15	0.063 ± 0.003	40 ± 3	4.3 ± 0.5	8.5 ± 0.5	431 ± 23	60 ± 1

Table 3 Mechanical properties in MD of the blends containing vulcanized NR

NR content (%)	Film thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	Tear strength (N/mm)
0	0.056 ± 0.001	43 ± 2	5.8 ± 0.5	21.9 ± 1.5	693 ± 42	81 ± 5
5	0.056 ± 0.002	61 ± 2	6.3 ± 0.1	16.9 ± 0.7	821 ± 26	74 ± 2

10	0.056 ± 0.002	57 ± 2	6.0 ± 0.4	14.0 ± 0.9	749 ± 29	68 ± 4
15	0.062 ± 0.006	43 ± 3	4.9 ± 0.2	12.6 ± 1.2	657 ± 52	64 ± 2

Table 4 Mechanical properties in TD of the blends containing vulcanized NR

NR content (%)	Film thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	Tear strength (N/mm)
0	0.056 ± 0.001	39 ± 1	5.3 ± 0.4	19.4 ± 1.5	635 ± 53	69 ± 6
5	0.056 ± 0.002	55 ± 1	5.3 ± 0.1	9.9 ± 0.9	520 ± 33	75 ± 3
10	0.056 ± 0.002	53 ± 3	5.5 ± 0.2	12.7 ± 0.4	748 ± 21	68 ± 2
15	0.062 ± 0.006	43 ± 2	5.0 ± 0.1	12.2 ± 1.2	666 ± 54	64 ± 1

Conclusion

The addition of NR in PBAT provided improvement in tensile properties and tear resistance. NR increased modulus, elongation at break and tear strength of the blends. The optimal NR content was 5-10%. Vulcanization in NR slightly changed tensile properties and tear resistance of the blends. Another usefulness of NR in the blends was acting as an antiblock agent.

References

1. N. Pisutthian; P. Laokijcharoen; V. Tanrattanakul, 12th International Seminar on Elastomers 2010, Cha-am, Thailand, Book of Abstracts. p. 167.
2. N. Pisutthian; P. Laokijcharoen; V. Tanrattanakul, 1st Polymer Conference of Thailand, 2010, Bangkok, Thailand, Book of Abstracts, p. 66.
3. T. Kijchavengkul; R. Auras; M. Rubino ; E. Alvarado ; J.R.C. Montero ; J.M. Rosales Polym. Degra. Stab. 2010, 95, 99.

PHYSICAL PROPERTIES OF POLY(BUTYLENE ADIPATE – CO – TEREPHTHALATE) BLENDED WITH COMPOUNDED RUBBERS

Nuda PHISUTTIAN¹, Pasaree LAOKIJCHAROEN², Varaporn TANRATTANAKUL^{1*}

¹ Department of Materials Science and Technology, Prince of Songkla University, Songkla 90112, Thailand

² National Metal and Materials Technology Center, Pathumthani, 12120, Thailand

*varaporn.t@psu.ac.th

Polymer blends between poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and natural rubber (NR) or PBAT and epoxidized natural rubber (ENR) were prepared by melt mixing in a twin screw extruder at 110°C. Sulfur and other accelerators were added during melt blending. The rubber phase was vulcanized during compression molding. The blends contained 10, 30 and 50 wt% of rubber. Two grades of ENR were employed: ENR25 (25 mol% epoxidation) and ENR50 (50 mol% epoxidation). Tensile properties and tear strength were tested at a speed of 500 mm/min. Hardness Shore A, resilience and tension set were investigated as well. Table 1-3 show physical properties the blends containing NR, ENR25 and ENR50, respectively. It is found that vulcanized rubber increased tensile properties, tear strength and resilience of the blends, compared to the unvulcanized rubber blends [1].

Table 1 Physical properties of PBAT blended with vulcanized NR

NR	E (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	Tear strength	Hardness	Resilience (%)
0 %	60.65	21.73	778	103.95	91	52
10 %	52.11	13.29	632	75.13	90	50
30 %	14.43	5.55	357	46.32	85	52
50 %	5.50	4.70	413	45.15	71	54

Table 2 Physical properties of PBAT blended with vulcanized ENR25

ENR25	E (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	Tear strength	Hardness	Resilience (%)
10 %	54.46	15.44	682	79.97	90	51
30 %	18.07	6.97	282	58.77	84	53
50 %	7.56	7.12	200	36.20	68	53

Table 3 Physical properties of PBAT blended with vulcanized ENR50

ENR50	E (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)	Tear strength	Hardness	Resilience (%)
10 %	49.38	16.37	647	87.53	89	52
30 %	24.09	11.66	383	67.11	81	33
50 %	8.06	6.26	211	51.23	66	20

References

1. N. Pisutthian, P. Laokijcharoen, and V. Tanrattanakul, the 1st Polymer Conference of Thailand, October 2010, Bangkok, Thailand, p.66.

