

การศึกษาเปรียบเทียบของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตจากยางธรรมชาติและ  
จากยางอีพีดีเอ็ม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARATIVE STUDY OF RECYCLED POLYPROPYLENE THERMOPLASTIC VULCANIZATES  
FROM NATURAL RUBBER AND FROM EPDM RUBBER



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

Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเปรียบเทียบของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลเทอร์มอ พลาสติกวัลคานไนเซตจากยางธรรมชาติและจากยางอีพีดีเอ็ม
โดย	นายทีปกร พันธุ์พรม
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมณีพิสุทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมณีพิสุทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

ทีปกร พันธุ์พรม : การศึกษาเปรียบเทียบของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตจากยางธรรมชาติและจากยางอีพีดีเอ็ม. ( COMPARATIVE STUDY OF RECYCLED POLYPROPYLENE THERMOPLASTIC VULCANIZATES FROM NATURAL RUBBER AND FROM EPDM RUBBER) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.อัญญาพร บุญมทิทธิสุทธิ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลโดยการเตรียมเป็นเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์ และเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตด้วยยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและยางถูกผสมด้วยสามอัตราส่วน ได้แก่ 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนักในเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ตามด้วยการอัดขึ้นรูป จากผลการทดลองพบว่าการเติมยางธรรมชาติหรือยางอีพีดีเอ็มช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาด ขณะที่ความทนแรงดึง ยังสม่ำเสมอ และความแข็งแรงลดลง อย่างไรก็ตาม เทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เติมยางอีพีดีเอ็มแสดงสมบัติเหนียวกว่าเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เติมยางธรรมชาติที่อัตราส่วนเดียวกันเนื่องจากมีความเข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลมากกว่า ซึ่งยืนยันได้จากสมบัติฐานวิทยา และในบรรดาเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์ทั้งหมด พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล/ยางที่อัตราส่วน 80/20 มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมจึงถูกเลือกมาเตรียมเป็นเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต โดยการเติมเพอร์ออกไซด์เป็นสารเชื่อมขวางที่อัตราส่วน 1 และ 2 ส่วนต่ออย่างร้อยละ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และฐานวิทยาของเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์และเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตพบว่ายังสม่ำเสมอของเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตสูงกว่าเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์เนื่องจากการเชื่อมขวาง อย่างไรก็ตามสมบัติอื่น ๆ ลดลงเมื่อเทียบกับเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์เพราะการตัดขาดของสายโซ่โดยเพอร์ออกไซด์

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์	ลายมือชื่อนิสิต .....
ปีการศึกษา	2565	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6270044023 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: thermoplastic vulcanizate, thermoplastic elastomers, recycled PP,  
natural rubber, EPDM rubber

Teepakorn Panpom : COMPARATIVE STUDY OF RECYCLED POLYPROPYLENE  
THERMOPLASTIC VULCANIZATES FROM NATURAL RUBBER AND FROM EPDM  
RUBBER. Advisor: Asst. Prof. ANYAPORN BOONMAHITTHISUD, Ph.D. Co-  
advisor: PHASAWAT CHAIWUTTHINAN, Ph.D.

This study aimed to improve the properties of recycled PP by preparing thermoplastic elastomers (TPEs) and thermoplastic vulcanizate (TPVs) with natural rubber (STR5L) and EPDM at different ratios. The recycled PP/rubber blends with three ratios, including 90/10, 80/20, and 70/30 (w/w), were mixed in an internal mixer at 170 °C for 10 mins, followed by compression molding. the results showed that the addition of either STR5L or EPDM rubber to the blends enhanced impact strength and elongation at break, but at the expense of the tensile strength, Young's modulus, and hardness. However, the TPEs by including EPDM exhibited superior properties than those including STR5L at the same ratio owing to the higher compatibility with recycled PP confirmed by morphological property. Among the TPEs, the recycled PP/rubber at 80/20 exhibited the appropriated mechanical properties. therefore, these ratio were chosen prepared TPVs by adding 1 and 2 phr of DCP as a crosslinking agent to examine and compare the mechanical, thermal, and morphological properties of the TPEs and TPVs. It was found that Young's modulus of the TPVs has higher than that of TPEs because of the crosslinking. However, other properties of the TPVs deteriorated as compared with the TPEs due to the chain scission by DCP.

Field of Study: Petrochemistry and  
Polymer Science

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์อย่างสมบูรณ์ได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำ ตลอดจนความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ในการทำงานวิจัย จากท่านผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ บุคคล และหน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังรายนามต่อไปนี้

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมทิตธิสุทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้แนะแนวทางการดำเนินงาน ให้คำปรึกษาทางวิชาการ รวมทั้งการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

2. ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้คอยให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ความรู้จนเกิดทักษะในการทำงาน รวมถึงสนับสนุนเงินทุนและอำนวยความสะดวกเรื่องสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

3. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิจัย

4. บริษัท ยูเนี่ยน เจ. พลัส (ไทยแลนด์) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล

5. บริษัท เคมี อินโนเวชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ยางอีพิตีเอ็ม

6. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ยางธรรมชาติ

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และเพื่อน ๆ ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ระหว่างการทำงานวิจัยนี้ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ทีปกร พันธุ์พรม

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญภาพ.....	2
บทที่ 1 บทนำ.....	5
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	5
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 พอลิเมอร์ผสม.....	7
2.2 เทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....	9
2.3 ยางธรรมชาติ.....	9
2.4 ยางแท่ง.....	12
2.5 ยางอีพีดีเอ็ม.....	13
2.6 เทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต.....	15
2.7 สารเชื่อมขวางโมเลกุลยาง.....	16
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	20

3.2 เครื่องมือที่ใช้ผสมและขึ้นรูปขึ้นทดสอบ .....	20
3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ .....	20
3.4 วิธีการทดลอง.....	21
3.5 วิเคราะห์และทดสอบ .....	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	32
4.1 สันฐานวิทยา .....	32
4.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ .....	35
4.2.1 สมบัติเชิงกลของ rPP และ TPES.....	38
4.2.2 สมบัติเชิงกลของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ ปริมาณต่าง ๆ .....	43
4.3 สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบ.....	47
4.3.1 เสถียรภาพทางความร้อน.....	47
4.3.2 พฤติกรรมทางความร้อน.....	52
4.4 สมบัติการคงรูปของสารประกอบอย่าง .....	56
4.5 ดรรชนีการหลอมไหล .....	57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	58
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	59
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก ดรรชนีการหลอมไหล .....	61
ภาคผนวก ข เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC .....	63
ภาคผนวก ค เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA .....	69
บรรณานุกรม.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	80



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดการกำหนดชั้นและขีดจำกัดคุณสมบัติต่าง ๆ ของยางแท่งเอสทีอาร์.....	13
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมระหว่าง rPP, STR 5L และ EPDM.....	23
ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ .....	36
ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ปริมาณต่าง ๆ .....	37
ตารางที่ 4.3 เสถียรภาพทางความร้อนของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 รวมถึง TPVs ที่ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr.....	48
ตารางที่ 4.4 พฤติกรรมทางความร้อนของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 รวมถึง TPVs ที่ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr.....	53
ตารางที่ 4.5 แสดงผลของการคงรูปของสารประกอบยางจากเครื่อง moving die rheometer.....	56
ตารางที่ 4.6 แสดงผลของการทดสอบดรรชนีการหลอมไหลตามมาตรฐาน ASTM D1238 ของ rPP, TPEs และ TPVs.....	57

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ.....	10
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของยางอีพิตีเอ็ม.....	14
รูปที่ 2.3 การผกผันของเฟสในกระบวนการไดนามิกส์วัลคาไนเซชัน.....	16
รูปที่ 2.4 กลไกทั่วไปในปฏิกิริยาเชื่อมขวางโมเลกุลของสารกลุ่มเพอร์ออกไซด์.....	18
รูปที่ 3.1 เครื่องผสมแบบปิด.....	22
รูปที่ 3.2 เครื่องขึ้นรูปแบบอัดด้วยความร้อน.....	24
รูปที่ 3.3 ขนาดของชิ้นงานทดสอบความทนต่อแรงดึง.....	25
รูปที่ 3.4 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดัดแบบ 3 จุด.....	25
รูปที่ 3.5 ขนาดชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทก.....	26
รูปที่ 3.6 ขนาดชิ้นงานทดสอบสมบัติความแข็ง.....	27
รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน.....	27
รูปที่ 3.8 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	29
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	29
รูปที่ 3.10 เครื่องเคลือบทองคำภายใต้สุญญากาศ.....	30
รูปที่ 3.11 เครื่องวัดดรรชนีการหลอมไหล.....	31
รูปที่ 4.1 สันฐานวิทยาของ rPP (a), rPP/STR 5L ที่อัตราส่วน 90/10 (b), 80/20 (d) และ 70/30 (f) และ rPP/EPDM ที่อัตราส่วน 90/10 (c), 80/20 (e) และ 70/30 (g).....	33
รูปที่ 4.2 สันฐานวิทยาของ TPVs rPP/STR 5L ที่เติม DCP 0 (a), 1 (c) และ 2 (e) phr และ rPP/EPDM ที่เติม DCP 0 (b), 1 (d) และ 2 (f) phr.....	34

รูปที่ 4.3 ความทนแรงกระแทกของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30.....	38
รูปที่ 4.4 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งล้มอดุลัส, การยืดตัว ณ จุดขาด (c) ของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30.....	39
รูปที่ 4.5 ความทนแรงดัดโค้งของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30.....	41
รูปที่ 4.6 ความแข็งแบบรีอคเวลล์ ของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30.....	42
รูปที่ 4.7 ความทนแรงกระแทกของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ ปริมาณ 0, 1 และ 2 phr.....	43
รูปที่ 4.8 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนต่อแรงดึง, (b) ยั่งล้มอดุลัส, การยืดตัว ณ จุดขาด (c) ของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ปริมาณ 0, 1 และ 2 phr.....	44
รูปที่ 4.9 ความทนแรงดัดโค้งของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ ปริมาณ 0, 1 และ 2 phr.....	45
รูปที่ 4.10 ความแข็งแบบรีอคเวลล์ ของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ปริมาณ 0, 1 และ 2 phr.....	46
รูปที่ 4.11 (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ rPP, STR 5L, และ EPDM.....	49
รูปที่ 4.12 (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	50
รูปที่ 4.13 (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM DCP ที่ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr.....	51
รูปที่ 4.14 สมบัติทางความร้อน: (a) ขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่สองและ (b) ขั้นตอนการเย็นตัว ของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ .....	54

**รูปที่ 4.15** สมบัติทางความร้อน: (a) ขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่สองและ (b) ขั้นตอนการเย็นตัวของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM DCP ที่ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr.....55



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันสังคมมีการพัฒนาในด้านต่าง ๆ อย่างรวดเร็ว การขยายตัวของชุมชนเมืองการเติบโตของเศรษฐกิจ ส่งผลให้มีการผลิตสินค้าและบรรจุภัณฑ์มากมาย มีแนวโน้มการใช้วัสดุกลุ่มพอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง พอลิเมอร์กลายเป็นวัสดุหลักสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน ด้วยปริมาณการใช้พลาสติกที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก [1] ทำให้เกิดปัญหาด้านปริมาณขยะพลาสติกที่เพิ่มสูงขึ้นตามมา หนึ่งในนั้นคือพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) เป็นพอลิเมอร์เทอร์มอพลาสติกที่มีการใช้งานที่หลากหลายที่สุดชนิดหนึ่ง ซึ่งมีการใช้งานมาก โดยเฉพาะด้านภาชนะบรรจุภัณฑ์ ชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องใช้ในครัวเรือน เนื่องจากมีความทนแรงกระแทกสูง อีกทั้งยังมีเสถียรภาพต่อความร้อนและสารเคมีที่ดี อย่างไรก็ตามพอลิโพรพิลีนมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมและการย่อยสลายทางชีวภาพสูงมาก ก่อให้เกิดปัญหาของขยะพลาสติกที่ถูกทิ้งในสิ่งแวดล้อมตามมา ด้วยเหตุนี้จึงมีการลดปริมาณของขยะพลาสติกด้วยการนำพอลิโพรพิลีนมาผ่านกระบวนการรีไซเคิลโดยผ่านกระบวนการทางความร้อนขึ้นรูปนำกลับมาใช้ใหม่ หากแต่การรีไซเคิลมักพบว่าสมบัติทางกลของพลาสติกลดลง เนื่องจากกระบวนการรีไซเคิลส่งผลให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติต่าง ๆ ลดลงไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้งาน [2]

ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดในการปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลโดยการเตรียมเป็นเทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์เป็นวัสดุผสมที่รวมสมบัติเด่นของเทอร์มอพลาสติกและอีลาสโตเมอร์หรือยางเข้าด้วยกันซึ่งจะประกอบด้วยสองเฟสได้แก่ เฟสแข็งจะให้สมบัติด้านความแข็งแรงและช่วยไม่ให้อ่อนเปราะเกิดการไหลอย่างอิสระภายใต้แรงกระทำ ณ อุณหภูมิใช้งาน โดยเฟสแข็งสามารถหลอมและไหลเมื่อให้ความร้อน ส่วนเฟสอีลาสโตเมอร์จะแสดงลักษณะความเป็นอีลาสโตเมอร์ที่มีสมบัติด้านความยืดหยุ่นและเพิ่มการทนต่อแรงกระแทกให้แก่วัสดุผสมเทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [3] และปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลโดยการเตรียมเป็นเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต โดยมีการเติมสารวัลคาไนซ์เพื่อให้ยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางโมเลกุล (crosslink) กระจายเป็นอนุภาคอยู่ในเมทริกซ์ (matrix) ของเทอร์มอพลาสติก [4] งานวิจัยนี้เลือกใช้ยางธรรมชาติกับยาง

อีพิตีเอ็ม โดยใช้ระบบเปอร์ออกไซด์ (peroxide) เนื่องจากสามารถใช้ได้กับยางที่มีพันธะคู่หรือไม่มีพันธะคู่ โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตจากยางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็ม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) ศึกษาการเตรียมเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์และเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตจากพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับยางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็มที่อัตราส่วนต่าง ๆ

2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสัญญาณวิทยาของเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์และเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตที่เตรียมได้

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) เตรียมเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากรีไซเคิลพอลิโพรพิลีนและยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็มที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยเลือกอัตราส่วนที่มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมนำมาเตรียมเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต

2) เตรียมเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตจากรีไซเคิลพอลิโพรพิลีนและยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็มโดยใช้เปอร์ออกไซด์เป็นสารเชื่อมขวางโมเลกุลของยาง

3) ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสัญญาณวิทยาของเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์และเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตที่เตรียมได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พอลิเมอร์ผสม (polymer blend)

พอลิเมอร์ผสมคือกระบวนการที่นิยมนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติให้แก่พอลิเมอร์โดยพอลิเมอร์ผสมเกิดจากการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกันเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ [5] ซึ่งวิธีการผสมนี้เป็นวิธีที่ง่ายกว่าการสังเคราะห์พอลิเมอร์ขึ้นมาใหม่โดยให้มีสมบัติตามที่ต้องการ การเตรียมพอลิเมอร์ผสมจะเลือกพิจารณาจากสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมาผสมกันให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ ข้อดีของการทำพอลิเมอร์ผสมคือสามารถทำได้ง่ายและยังประหยัดต้นทุนในการผลิต แต่การทำพอลิเมอร์ผสมก็มีข้อจำกัดเนื่องจากการผสมนั้นจะต้องพิจารณาถึงโครงสร้าง ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสม โดยการผสมที่เข้ากันได้ดีหรือไม่ดีจะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ ความเป็นจริงการทำพอลิเมอร์ผสมที่มีความเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันนั้นมีความเป็นไปได้ยากเนื่องจากพอลิเมอร์ผสมไม่ได้หลอมรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์แต่จะอยู่ในลักษณะของพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งเป็นวัฏภาคหลัก (continuous phase) และพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งเป็นวัฏภาครองหรือวัฏภาคที่กระจายตัว (dispersed phase) โดยการกระจายตัวนั้นเป็นตัวบ่งชี้ถึงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมถ้าหากกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ก็จะมีแนวโน้มที่ดี แต่ถ้าหากเกิดการรวมตัว (aggregate) หรือรวมกันเป็นกลุ่มใหญ่ (agglomerate) ก็จะเกิดเป็นข้อบกพร่อง (defects) ให้แก่พอลิเมอร์ผสม [6], [7]

ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของพอลิเมอร์ผสม สามารถถูกอธิบายด้วยความสัมพันธ์ของเทอร์โมไดนามิกส์ เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้ดีเป็นวัฏภาคเดียวกันจะมีค่าพลังงานอิสระในการผสม (Gibbs free energy,  $\Delta G_m$ ) น้อยกว่าศูนย์หรือเป็นลบ โดยค่า  $\Delta G_m$  หาได้ ดังสมการที่ 2.1

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m \quad 2.1$$

จากสมการที่ 2.1 จะสังเกตได้ว่าถ้าต้องการให้พจน์  $\Delta G_m$  เป็นลบได้ก็ต่อเมื่อค่าเอนทัลปี (enthalpy,  $\Delta H_m$ ) หรือค่าความร้อนของการผสมที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าน้อยกว่าค่าของผลคูณระหว่างเอนโทรปีกับค่าเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงไป (entropy,  $\Delta S_m$ ) ซึ่งในความเป็นจริงไม่มีทางที่พจน์ของ  $T\Delta S_m$  จะเป็นลบได้เนื่องจากเอนโทรปีที่อยู่ในหน่วยของศาเคลวิน (K) ไม่มีโอกาสติดลบเนื่องจากเอนโทรปีต่ำสุดคือ 0 องศาเคลวิน และค่าเอนโทรปีของพอลิเมอร์มักจะมีค่าเป็นบวกเสมอโดยมาจากความยุ่งเหยิงของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ต้องพิจารณาที่พจน์ของ  $\Delta H_m$  เป็นส่วนใหญ่โดยถ้าจะให้ค่าของ  $\Delta H_m$  ติดลบได้การผสมนั้นจะต้องออกมาเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic)

ผสมเข้ากันได้ (miscible blends) การพิจารณาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมมักจะพิจารณาที่ค่าอุณหภูมิสถานะแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) ที่แสดงออกมาเพียงค่าเดียว โดยจะมีค่าอยู่ระหว่างค่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดโดยพิกของ  $T_g$  ที่ได้จะมีลักษณะเป็นพีกกว้าง (broad peak) การผสมเข้ากันเป็นวิภาคเดียว ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์อาจเกิดได้จากสมบัติของพอลิเมอร์ ที่มีความเข้ากันได้ โครงสร้างทางเคมี ความเป็นขั้ว ความหนืด อันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์คู่ผสม

ผสมเข้ากันไม่ได้ (immiscible blends) พอลิเมอร์ที่ผสมเข้ากันไม่ได้จะแสดงค่า  $T_g$  ออกมาเป็น 2 ค่าหรือหมายถึงแสดงค่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดให้เห็นอย่างชัดเจน อีกทั้งยังเกิดการแยกวิภาคออกจากกันไม่รวมเป็นวิภาคเดียวหรือมีรอยต่อระหว่างวิภาคที่ไม่ดีส่งผลให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้นั้นด้อยกว่าสมบัติเดิมของพอลิเมอร์ ซึ่งการแยกออกของวิภาคสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมโดยใช้สารช่วยผสม (compatibilizer) เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ให้แก่พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดผสมเข้ากันได้บางส่วน (partially miscible blends) พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้บางส่วนอาจเกิดจากการผสมพอลิเมอร์ที่มีความเข้ากันได้เล็กน้อยในระดับไม่ถึงนาโนเมตรแต่มีสมบัติที่ดีขึ้นกว่าเดิม หรือเกิดจากการใช้สารช่วยผสมเข้ามาเป็นตัวประสานให้รอยต่อระหว่างวิภาคมีความเข้าเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น หรือมีอันตรกิริยาเกิดขึ้นระหว่างหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด โดยพอลิเมอร์ผสมประเภทนี้จะมีความ  $T_g$  แสดงออกมาไม่เท่ากับค่าเดิมก่อนการผสมแต่จะแยกกันเหมือนการผสมเข้ากันไม่ได้ที่มีค่า  $T_g$  เคลื่อนเข้าหากัน



## 2.2 เทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomers; TPEs)

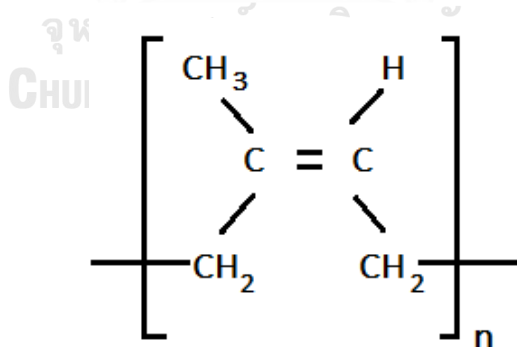
เทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์เป็นวัสดุผสมที่รวมสมบัติเด่นของเทอร์มอพลาสติกและอิลาสโตเมอร์หรือยางเข้าด้วยกัน [8] ซึ่งจะประกอบด้วยสองเฟส คือ ส่วนที่เป็นเฟสแข็ง (hard phase) ซึ่งเป็นเทอร์มอพลาสติก (thermoplastic) และส่วนที่เป็นเฟสนิ่ม (soft phase) [4] ซึ่งเป็นอิลาสโตเมอร์หรือยาง โดยส่วนเฟสแข็งจะให้สมบัติด้านความแข็งแรงและช่วยไม่ทำให้ส่วนเฟสยางเกิดการไหลอย่างอิสระภายใต้แรงกระทำ ณ อุณหภูมิใช้งาน โดยเฟสแข็งสามารถหลอมและไหลเมื่อให้ความร้อน ส่วนเฟสอิลาสโตเมอร์จะแสดงลักษณะความเป็น อิลาสโตเมอร์ที่มีสมบัติด้านความยืดหยุ่นและเพิ่มการทนต่อแรงกระทำให้แก่วัสดุผสมเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์ โดยเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์สามารถขึ้นรูปได้เหมือนพลาสติก มีสมบัติยืดหยุ่นอ่อนนุ่มคล้ายยางแต่ยางเทอร์มอพลาสติกจะมีสมบัติเหมือนยางเฉพาะในอุณหภูมิบางช่วง (ขึ้นกับชนิดของเทอร์มอพลาสติก) โดยทั่วไปจะหมายถึง ณ อุณหภูมิห้อง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยางเทอร์มอพลาสติกจะอ่อนตัวและไหลได้เหมือนพลาสติก จึงสามารถนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีด (injection moulding machine) เครื่องเป่า (blow moulding machine) เครื่องหลอมอัดรีด (extruder) ภายหลังจากการขึ้นรูปเมื่อยางเย็นลงยางเทอร์มอพลาสติกก็จะเปลี่ยนสภาพจากของเหลวที่ไหลได้ไปเป็นของแข็งที่มีสมบัติคล้ายยาง และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

## 2.3 ยางธรรมชาติ (natural rubber)

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea brazilliensis* ซึ่งมีกำเนิดมาจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีตได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30% แขนงลอยอยู่ในน้ำ [9] ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% เรียกว่าน้ำยางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมถุงมือยาง และถุงยางอนามัย แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรีตได้มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็รีดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 °C เป็นเวลา 3 วัน ก็จะได้ยางแผ่นรมควัน [10]

นอกจากยางแผ่นรมควันแล้ว อุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางมีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควัน ผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือยางแผ่น ขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR 5L ซึ่งมีสีจางมาก จำเป็นต้องใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบ หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR 20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสีเจือปนสูงและมีสีเข้มก็อาจใช้ยางแผ่นหรือขี้ยางเป็นวัตถุดิบ ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยากต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นราคายางแท่งจึงสูงกว่ายางแผ่นรมควัน

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือ มี isoprene หรือ  $(C_5H_8)_n$  โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15,000-20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืดจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำจะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้อยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion Resistance) สูง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

ลักษณะเด่นอีกอย่างของยางธรรมชาติ คือ ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติพิเศษด้านการเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการ

ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (assemble) ชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ ยางมอเตอร์ไซค์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามยางดิบจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพไม่เสถียรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ยางจะอ่อนนุ่มและเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อนแต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้งานจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีอื่น เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่าง ๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (rubber compound) ที่ได้จะนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เราเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่าง ๆ มากมาย เนื่องจากมีปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรง และมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ยางรัดของ เป็นต้น

ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (heat build-up) ที่เกิดขึ้นขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำ และอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเปาะน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความทนต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่าง ๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดดออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด สารในกลุ่มของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขี้ น้ำมัน และสารเคมีต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับสารเคมีดังกล่าว

## 2.4 ยางแท่ง (standard thai rubber; STR)

ยางแท่ง คือผลิตภัณฑ์ที่มีการผลิตจากน้ำยางสดหรืออาจใช้ยางแห้ง เช่น ยางแผ่นดิบ ยางก้อนถ้วย มาเป็นวัตถุดิบ ซึ่งมีประเทศมาเลเซียเป็นผู้คิดค้นและพัฒนา โดยใช้หลักเกณฑ์ การกำหนดชั้นยางจากการตรวจสอบคุณสมบัติของยางให้เป็นไปตามมาตรฐาน เนื่องจากยางแผ่นเป็นการจัดชั้นด้วยสายตา ซึ่งอาจให้ผลและคุณภาพที่ไม่แน่นอน ด้วยเหตุนี้อุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่ ในปัจจุบันจึงเริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์แทน เนื่องจากยางแท่ง มีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางแผ่น และผ่านการทดสอบเพื่อจัดชั้นคุณภาพตามหลักวิชาการ โดยพิจารณาจากปริมาณของสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในยางเป็นสำคัญ รวมทั้งพิจารณาตัวแปรอื่นๆ ร่วมด้วย อาทิ ปริมาณเถ้า (ash content) ดัชนีความอ่อนตัว (plasticity retention index: PRI) และอื่นๆ ปัจจุบันการผลิตยางแท่งในประเทศไทยจะผลิตตามมาตรฐาน Technically Specified Rubber ที่ใช้มาตรฐานสากลในการควบคุมคุณภาพ รับรองโดย International ISO Standard ซึ่งเป็นการผลิตแบบหนึ่งที่ยอมรับในวงการผู้บริโภคนิยมโดยทั่วไปมีชื่อเรียกว่า ยางแท่งเอสทีอาร์ (STR : Standard Thai Rubber) [11] ซึ่งมีรายละเอียดคุณสมบัติแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 โดยยางแท่งที่กำหนดในมาตรฐานยางแท่งเอสทีอาร์ มี 8 ชั้น ได้แก่

2.4.1 ยางแท่งเอสทีอาร์ XL (STR XL)

2.4.2 ยางแท่งเอสทีอาร์ 5L (STR 5L)

2.4.3 ยางแท่งเอสทีอาร์ 5 (STR 5) ณ์มหาวิทยาลัย

2.4.4 ยางแท่งเอสทีอาร์ 5CV (STR 5CV) CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4.5 ยางแท่งเอสทีอาร์ 10 (STR 10)

2.4.6 ยางแท่งเอสทีอาร์ 10CV (STR 10CV)

2.4.7 ยางแท่งเอสทีอาร์ 20 (STR 20)

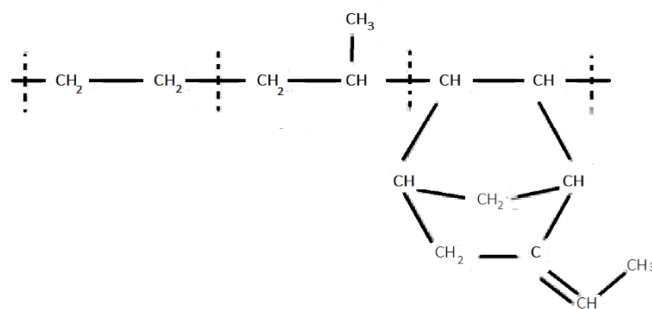
2.4.8 ยางแท่งเอสทีอาร์ 20CV (STR 20CV)

ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดการกำหนดชั้นและขีดจำกัดคุณสมบัติต่าง ๆ ของยางแท่งเอสทีอาร์

ผลิตจาก สมบัติ / ชั้นยางแท่ง	น้ำยาง		น้ำยาง / ยางแผ่น		ยางก้อน / ยางแผ่น			
	STR XL	STR 5L	STR 5	STR 5CV	STR 10	STR 10CV	STR 20	STR 20CV
ปริมาณสิ่งสกปรก, %ไม่เกิน	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
ปริมาณเถ้า, %ไม่เกิน	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.80	0.80
ปริมาณไนโตรเจน, %ไม่เกิน	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
ปริมาณสิ่งระเหย, %ไม่เกิน	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ความอ่อนตัวเริ่มแรก, ไม่ต่ำกว่า	35.00	35.00	30.00	-	30.00	-	30.00	-
ดัชนีความอ่อนตัว, ไม่ต่ำกว่า	60.00	60.00	60.00	60.00	50.00	50.00	40.00	40.00
สี วัดด้วยโลวิบอนด์, ไม่เกิน	4.00	6.00	-	-	-	-	-	-

## 2.5 ยางอีพดีเอ็ม (EPDM rubber)

ยางอีพดีเอ็ม (ethylene-propylene diene rubber) ได้จากการสังเคราะห์ โดยการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างเอทิลีน (ethylene) กับโพรพิลีน (propylene) (ดังรูปที่ 2.2) โดยไดอินที่เติมลงไปจะไปเกาะอยู่ที่สายโซ่หลักในลักษณะกิ่งก้านสาขา ทำให้ยางอีพดีเอ็มมีส่วนของพันธะคู่ (ส่วนที่ไม่อิ่มตัว) จึงสามารถวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน และเพอร์ออกไซด์ได้ ยางที่มีขายทั่วไปจะมีเอทิลีนอยู่ประมาณ 45-85 % โดยโมล และมีปริมาณไดอินอยู่ในช่วง 3-11 % โดยโมล [12]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของยางอีพีดีเอ็ม

จากลักษณะโครงสร้างโมเลกุลจะเห็นว่ายางอีพีดีเอ็มเป็นยางไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงไม่ทนต่อน้ำมัน หรือสารละลายที่ไม่มีขั้ว และเนื่องจากการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ในสายโมเลกุลเป็นแบบไม่มีรูปแบบ (random) ทำให้ได้พอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous) ยางชนิดนี้จึงไม่ตกผลึกส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำ และต้องอาศัยสารเสริมแรง (reinforcing filler) เข้าช่วย อย่างไรก็ตาม ในยางที่มีสัดส่วนของเอทิลีนสูงจะมีสมบัติลึกลงบ้างจึงส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงในสภาพยังไม่คงรูปสูง (high green strength) สามารถที่จะเติมน้ำมัน และสารตัวเติมได้มากซึ่งเป็นจุดเด่นของยางชนิดนี้ เพราะในบางครั้งอาจเติมสารตัวเติมได้มากถึง 2 เท่าของปริมาณยางที่ใช้ (200 phr) แต่ข้อเสียของยางที่มีปริมาณเอทิลีนสูงคือ การบดผสมยางที่อุณหภูมิต่ำจะทำได้ยาก และสมบัติของยางที่อุณหภูมิ ต่ำจะไม่ดีเพราะการตกผลึกของยางจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง

สมบัติทั่วไปของยางอีพีดีเอ็ม (ethylene propylene diene rubber, EPDM) เป็นยางที่มี สมบัติเด่นคือมีความทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงแดด ออกซิเจน ความร้อน โอโซน และ สารเคมีดีกว่ายางธรรมชาติยางบิวทาไดอิน (butadiene rubber, BR) และยางสไตรีนบิวทาไดอิน (styrene butadiene rubber, SBR) ยางอีพีดีเอ็มนิยมใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ใช้ภายนอกอาคาร กลางแจ้ง และงานที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง

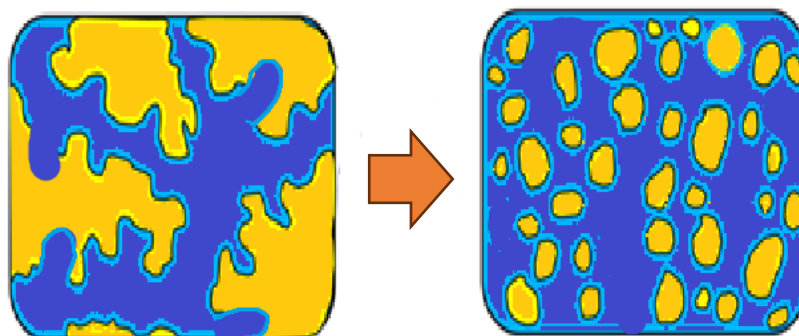
การวัลคาไนซ์ยางอีพีดีเอ็ม ยางอีพีดีเอ็มสามารถคงรูปได้โดยใช้เพอร์ออกไซด์หรือใช้กำมะถัน ร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูงสำหรับการคงรูปด้วยระบบกำมะถัน ปริมาณของกำมะถัน และสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะขึ้นอยู่กับชนิด และปริมาณของไดอินที่มีอยู่ในโมเลกุล ส่วนใหญ่แล้วจะ ใช้กำมะถัน (หรือสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกตัวให้กำมะถัน) ประมาณ 0.2 ถึง 2.0 phr นอกจากนี้หาก ต้องการให้ยางเกิดการคงรูปได้เร็ว และมีระดับของการคงรูปสูงก็ไม่ควรใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงตัว

เดี่ยว แต่ควรใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหลายๆ ตัวร่วมกันเพื่อให้เกิดผลแบบเสริม (synergistic effect) สารตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มที่นิยมใช้ร่วมกันได้แก่ กลุ่มไฮอะโซล กลุ่มไฮยูแรม และ กลุ่มไดไฮโอคาร์บาเมต ปัญหาหลักที่มักพบในยางอีพิตีเอ็มคือปัญหาการบวมที่พื้นผิวของสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกตัวให้กำมะถันให้ต่ำกว่า 0.8 phr หรือสังเกตว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาตัวใดที่บวม และทำการปรับลดปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยานั้นๆ ให้อยู่ระดับที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหา

การใช้งานยางอีพิตีเอ็ม ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ภายนอกเนื่องจากทนต่อสภาพอากาศได้ดี และใช้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เป็นส่วนใหญ่ เช่น ยางขอบกระจก ยางปิดน้ำฝน ท่อยางของหม้อน้ำรถยนต์ (radiator hose) เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นฉนวนหุ้มสายเคเบิล สายพานลำเลียง แผ่นยางกันน้ำ แผ่นยางมุงหลังคา

## 2.6 เทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต (thermoplastic vulcanizate; TPVs)

เทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตเป็นพลาสติกที่รวมข้อดีของเทอร์มอพลาสติก คือสามารถนำมาหลอมใช้ใหม่ และข้อดีของเทอร์มอเซต ในด้านการต้านแรงเชิงกล การใช้งานที่อุณหภูมิสูงไว้ด้วยกัน [13] โดยเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตคือ พอลิเมอร์ผสมระหว่างพลาสติกและยาง แต่วิภูภาคยางจะถูกทำให้คงรูปโดยการใส่สารคงรูปเพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางในวิภูภาคของยางในระหว่างกระบวนการผสมหรือที่เรียกว่ากระบวนการไดนามิกวัลคาไนเซชัน (dynamic vulcanization; DV) [14] (แสดงดังรูปที่ 2.3) จะเห็นได้ว่าจากเดิม ที่วิภูภาคของพอลิเมอร์ผสมเป็นแบบวิภูภาคร่วมกัน (co-continuous phase) แต่เมื่อทำการใส่สารคงรูปแล้วในระหว่างกระบวนการผสมวิภูภาคยางที่เกิดการเชื่อมขวางจะมีความหนืดสูงเมื่อเจอกับแรงเฉือนและแรงบิดจะทำให้วิภูภาคยางเกิดการยึดตัวและขาดออกเป็นวิภูภาคขนาดเล็ก (dispersed phase) อยู่ในวิภูภาคของพอลิเมอร์คู่ผสมหรือเรียกได้ว่าการผกผันของวิภูภาคเป็นต้น โดยข้อดีของการทำ DV คือการทำให้วิภูภาคยางมีขนาดลดลง และลดการรวมตัวกลับมาเป็นก้อนของยาง นอกจากนี้จะยังช่วยให้สมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น และช่วยให้ทนต่อความร้อน ทนต่อการเสื่อมสภาพต่อสิ่งแวดล้อม เช่น แสงอัลตราไวโอเล็ต โอโซน เป็นต้น



รูปที่ 2.3 การผกผันของเฟสในกระบวนการไดนามิกส์วัลคาไนเซชัน

## 2.7 สารเชื่อมขวางโมเลกุลยาง (vulcanizing or curing agent)

สารที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลยางเป็นสารสำคัญที่ใส่ลงไปนยางแล้วทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน (vulcanization) หรือการบ่มยางให้สุก ซึ่งจะทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากเทอร์โมพลาสติกไปเป็นเทอร์โมเซตส่งผลให้ยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนที่ดีขึ้น [15] สารเชื่อมขวางโมเลกุลยางที่ใช้มีอยู่ด้วยกัน 3 ระบบใหญ่ ๆ คือ ระบบที่ใช้กำมะถัน (sulfur) ระบบที่ใช้สารกลุ่มเปอร์ออกไซด์ (peroxide) และระบบที่ใช้สารเคมีอื่น เช่น โลหะออกไซด์

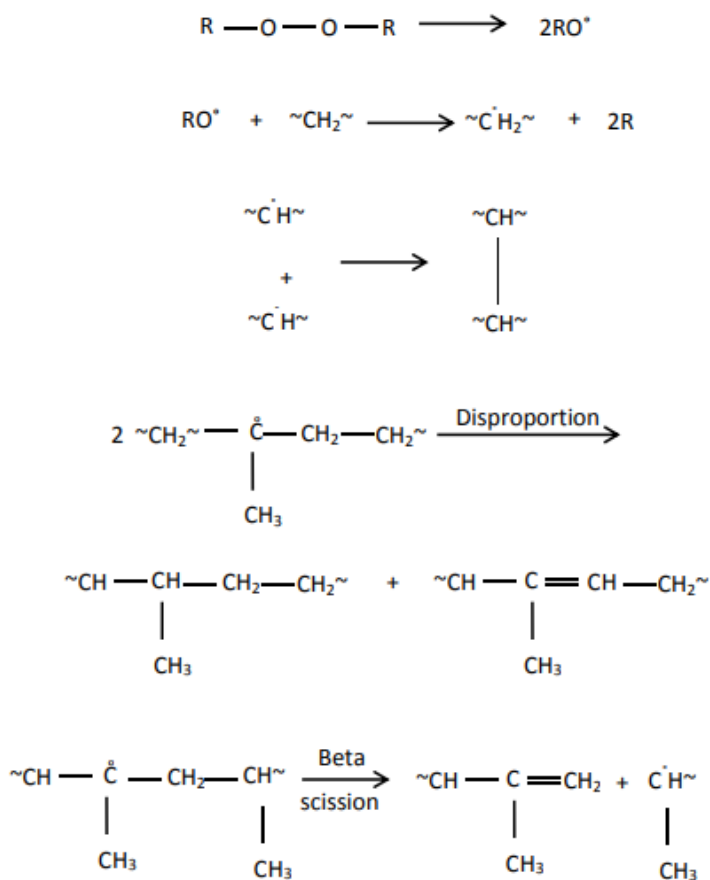
2.7.1 ระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยกำมะถัน ระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยกำมะถันเป็นนิยมใช้กันมากเนื่องจากมี ราคาถูกทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าระบบอื่นๆ ยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่การเชื่อมขวาง โมเลกุลด้วยระบบกำมะถันมีข้อจำกัดคือ ในการผสมสูตรต้องใช้สารเคมีหลายตัว เช่น สารเร่ง ปฏิกิริยา (accelerators) และสารกระตุ้นปฏิกิริยา (activator) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเติมกำมะถันยัง เป็นสีเหลืองขุ่นจึงไม่เหมาะกับงานประเภทแต่งสี และใช้ได้กับยางที่มีพันธะคู่เท่านั้น เช่น ยาง ธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ styrene-butadiene rubber (SBR), cis-1,4-polyisoprene (IR), Butyl Rubber (BR) และ Nitrile Butadiene Rubber (NBR) เป็นต้น



2.7.2 ระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยสารกลุ่มเพอร์ออกไซด์ ระบบเพอร์ออกไซด์สามารถใช้ได้กับยางที่มีพันธะคู่ หรือไม่มีพันธะคู่ใน โมเลกุลก็ได้ แต่จะมีต้นทุนที่สูงกว่าการเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยระบบกำมะถัน และสารกลุ่มเพอร์ออกไซด์จัดเป็นสารเคมีที่อาจเกิดการลุกติดไฟหรือระเบิดได้ สารกลุ่มเพอร์ออกไซด์จึงจัดว่าเป็น สารค่อนข้างอันตราย ดังนั้นการเก็บรักษาต้องทำด้วยความระมัดระวัง

ข้อดีของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยสารกลุ่มเพอร์ออกไซด์ ระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยสารกลุ่มเพอร์ออกไซด์มีข้อดีเหนือระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยกำมะถันหลายประการคือ ไม่มีปัญหาเรื่องการบลูม (bloom) ของสารเคมีขึ้นที่ผิวหน้าชิ้นงาน, ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังเกิดปฏิกิริยา, ยางที่ได้มีค่าการต้านแรงเชิงกลที่ดี, ชิ้นงานที่ได้จะมีการคืนตัวที่ดีกว่าเมื่อถูกใช้งานที่มีแรงกดทับเป็นเวลานาน, กำหนดสูตรผลิตได้ง่าย และ ปฏิกิริยาไม่ผันกลับ

กลไกการเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยสารกลุ่มเพอร์ออกไซด์ มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ เมื่อเพอร์ออกไซด์ได้รับพลังงานจากภายนอกจะเกิดการสลายตัวเป็นอนุมูลอิสระ จากนั้นอนุมูลอิสระจะดึงอะตอมไฮโดรเจนออกจากสายโซ่โมเลกุลทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระของ พอลิเมอร์ (polymer radical) เมื่ออนุมูลอิสระของ 2 ตัวมาพบกันจึงเกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุล นอกจากนั้นยังเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพของการเกิดพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอน (beta scission) ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สั้นลง (ดังแสดงในรูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 กลไกทั่วไปในปฏิกิริยาเชื่อมขวางโมเลกุลของสารกลุ่มเปอร์ออกไซด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 Chen และคณะ [16] ศึกษาการเตรียมเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตจากพอลิโพรพิลีน และ ยางอีพีดีเอ็มโดยใช้เปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) ในการวัลคาไนซ์ โดยมี (zinc dimethacrylate, ZDMA) ทำหน้าที่เป็น co-agent เพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตโดยผลของสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่าการเติม ZDMA ส่งผลให้เทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตมีการเชื่อมขวางเพิ่มมากขึ้นซึ่งสามารถสังเกตได้จากขนาดและจำนวนของโพร่งที่ลดลงเมื่อเติม ZDMA อีกทั้งพบว่าความเป็นผลึกของผลิตภัณฑ์ลดลงเนื่องจากการเชื่อมขวางไปขัดขวางความเป็นผลึกของสายโซ่พอลิโพรพิลีน

2.8.2 Korn และคณะ [17] ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์เปรียบเทียบกับเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและยางธรรมชาติ เมื่อพิจารณาผลของสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์ไม่เกิดการกระจายตัวของเฟสยาง ขณะที่เทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตพบการกระจายตัวของยางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32–0.64 ไมโครเมตร

2.8.3 Anoma และคณะ [18] ศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของเพอร์ออกไซด์ชนิดต่างๆ ที่ใช้กับเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและยางธรรมชาติ พบว่าการใช้เพอร์ออกไซด์ สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล โดยมีความทนแรงดึงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีการเชื่อมขวางของเฟสยาง โดยเฉพาะสูตรที่ใช้ DCP และ di(tert-butylperoxyisopropyl)benzene (DTBPIB) ซึ่งเพอร์ออกไซด์ทั้งสองชนิดนี้ทำให้เทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตมีลักษณะสัณฐานวิทยาที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ดีเหนือกว่าสูตรที่ใช้เพอร์ออกไซด์ชนิดอื่น

2.8.4 Martin และคณะ [19] ศึกษาการกระจายตัวและสัณฐานวิทยาเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและยางอีพิตีเอ็ม พบว่าหากมีการเชื่อมขวางของเฟสยางมากขึ้นในขั้นตอนการผสม (การเตรียมคอมพาวด์ยางอีพิตีเอ็มก่อนนำไปผสมกับพอลิโพรพิลีน) จะส่งผลให้ยางกระจายตัวน้อยลง เนื่องจากการเชื่อมขวางทำให้ยางบางส่วนอยู่รวมกัน

2.8.5 Nakason และคณะ [20] ศึกษาการเตรียมเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตจากพอลิโพรพิลีนและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน, เพอร์ออกไซด์ และผสมทั้งเพอร์ออกไซด์กับกำมะถัน พบว่าสมบัติเชิงกลในด้านความทนแรงดึงสูตรที่ใช้เพอร์ออกไซด์จะดีกว่าสูตรที่ใช้กำมะถันและสูตรที่ผสมทั้งเพอร์ออกไซด์กับกำมะถัน เนื่องจากเพอร์ออกไซด์ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่ของพอลิโพรพิลีน แต่ในสูตรที่ใช้เพอร์ออกไซด์จะมีค่าความยืดอยู่ตัวที่มากที่สุด และพบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของระบบใช้เพอร์ออกไซด์จะมีขนาดอนุภาคของยางที่เล็กกว่าเมื่อเทียบกับสูตรที่ใช้กำมะถันและสูตรที่ผสมทั้งเพอร์ออกไซด์กับกำมะถัน

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

3.1.1 เม็ดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (MFI = 6 g/10 min,  $T_m = 162.5$  °C และความหนาแน่น 0.85 - 0.92 g/cm<sup>3</sup>) จากบริษัท ยูเนียน เจ. พลาสติก (ไทยแลนด์) จำกัด

3.1.2 ยางอีพดีเอ็ม NORDEL IP 4520 (สัดส่วนเอทิลีน 50 %, โพรพิลีน 45 % และไดอิน 5 % โดยน้ำหนัก และความหนาแน่น 0.86 g/cm<sup>3</sup>) จากบริษัท เคมี อินโนเวชั่น จำกัด

3.1.3 ยางธรรมชาติ STR 5L (ปริมาณสิ่งสกปรกไม่เกิน 0.04% , มีค่าสีไม่เกิน 6 โลวิบอนด์ และความหนาแน่น 0.92 g/cm<sup>3</sup>) ได้รับจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

3.1.4 ไดคิวมิลเพอร์ออกไซด์ Product 34988 (flash point > 110 °C) บริษัท Acros organics

##### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ผสมและขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

3.2.1 เครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) รุ่น HAAKE PolyLab OS บริษัท Thermo Scientific (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

3.2.2 เครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (two roll mill) บริษัท Labtech Engineering Co., Ltd, Thailand (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.2.3 เครื่องขึ้นรูปแบบอัดด้วยความร้อน (compression molding) บริษัท Labtech Engineering Co., Ltd, Thailand (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

##### 3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ

3.3.1 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine; UTM) รุ่น Tinius Olsen H50SK บริษัท Calserve, Thailand (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.3.2 เครื่องทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก (izod Impact Tester) บริษัท Gotech, Taiwan (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.3.3 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.3.4 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น Mettler Toledo TGA/SDTA 851 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.3.5 เครื่องวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อน (differential scanning calorimeter, DSC) (ศูนย์บริการวิเคราะห์ทดสอบ สวทช)

3.3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น SU5000 บริษัท HITACHI (ศูนย์บริการวิเคราะห์ทดสอบ สวทช)

### 3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับยางธรรมชาติ และกับยางอีพดีเอ็ม

เตรียมเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล โดยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากเม็ดพลาสติก ทำการบดยางธรรมชาติและยางอีพดีเอ็ม โดยรีดผ่านลูกกลิ้งคู่เป็นแผ่นแล้วตัดเป็นชิ้น ชิ้นตอนการเตรียมเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์จะดำเนินการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (ดังรูปที่ 3.1) เริ่มจากเปิดเครื่องผสมที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิคงที่ใส่เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ลงไปในเครื่องผสมเป็นเวลา 4 นาที จากนั้นเริ่มให้แรงเฉือนโดยเปิดความเร็วรอบของโรเตอร์ 80 รอบต่อนาที แล้วใส่ยางธรรมชาติ หรือ ยางอีพดีเอ็ม ลงไปในเครื่องผสม โดยปริมาณที่ผสมในแต่ละตัวอย่างนั้นแสดงในตารางที่ 3.1และทำการผสมต่อไปอีกเวลา 6 นาที จากนั้นนำเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ออกจากเครื่องผสมปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วจึงนำไปขึ้นรูป ตามขั้นตอน 3.4.3

### 3.4.2 การเตรียมเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตจากพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับยางธรรมชาติและกับยางอีพิตีเอ็ม

เตรียมยางคอมพาวด์ยางธรรมชาติและยางคอมพาวด์อีพิตีเอ็ม ดังตารางที่ 3.1 โดยผสมยางธรรมชาติและกับยางอีพิตีเอ็ม กับไดควิมิลเพอร์ออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 1 และ 2 ส่วนต่ออย่างร้อยละ (phr) ด้วยเครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้มาดำเนินการตามขั้นตอนผสมเช่นเดียวกับ 3.4.1 เพื่อทำการเตรียมเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต



รูปที่ 3.1 เครื่องผสมแบบปิด

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมระหว่าง rPP, STR 5L และ EPDM

Sample	rPP	STR 5L	EPDM	DCP
rPP	100	-	-	-
90/10 rPP/STR 5L	90	10	-	-
80/20 rPP/STR 5L	80	20	-	-
70/30 rPP/STR 5L	70	30	-	-
90/10 rPP/EPDM	90	-	10	-
80/20 rPP/EPDM	80	-	20	-
70/30 rPP/EPDM	70	-	30	-
1phr 80/20 rPP/STR 5L	80	20	-	1
2phr 80/20 rPP/STR 5L	80	20	-	2
1phr 80/20 rPP/EPDM	80	-	20	1
2phr 80/20 rPP/EPDM	80	-	20	2

### 3.4.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน

นำเทอร์มอพลาสติกโพลีเอทิลีนและเทอร์มอพลาสติกโพลีคาร์บอเนต ไปบดด้วยเครื่องบด และนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ (ดังรูปที่ 3.2) โดยให้ความร้อนก่อนการอัด (preheat) เป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จากนั้นไล่อากาศเพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศในชิ้นงานด้วยแรงอัดความดัน 125 บาร์เป็นเวลา 10 วินาที แล้วกดอัดขึ้นรูปชิ้นงานที่แรงอัดความดัน 125 บาร์ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที และทำการหล่อเย็นด้วยระบบน้ำ ให้ชิ้นงานเย็นตัวเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำชิ้นงานออกแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนนำไปทดสอบ



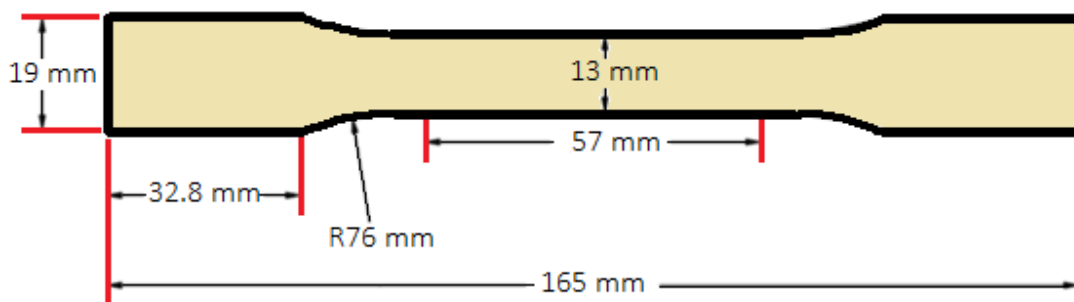
รูปที่ 3.2 เครื่องขึ้นรูปแบบอัดด้วยความร้อน

### 3.5 วิเคราะห์และทดสอบ

#### 3.5.1 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (tensile strength)

การทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซต ตามมาตรฐาน ASTM D638 ชิ้นงานมีขนาดตามประเภทที่ 1 ความยาว 165 มิลลิเมตร และความหนา 3 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 3.3) ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) โดยใช้ load cell ขนาด 5000 นิวตัน ความเร็วในการดึง (crosshead speed) 50 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทดสอบชิ้นงานซ้ำอย่างน้อย 5 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ย

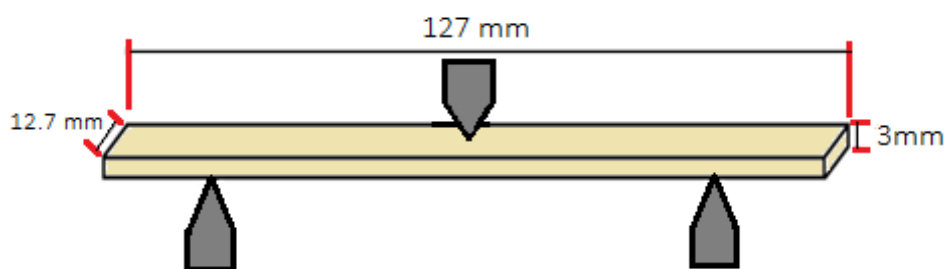




รูปที่ 3.3 ขนาดของชิ้นงานทดสอบความทนต่อแรงดึง

### 3.5.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength)

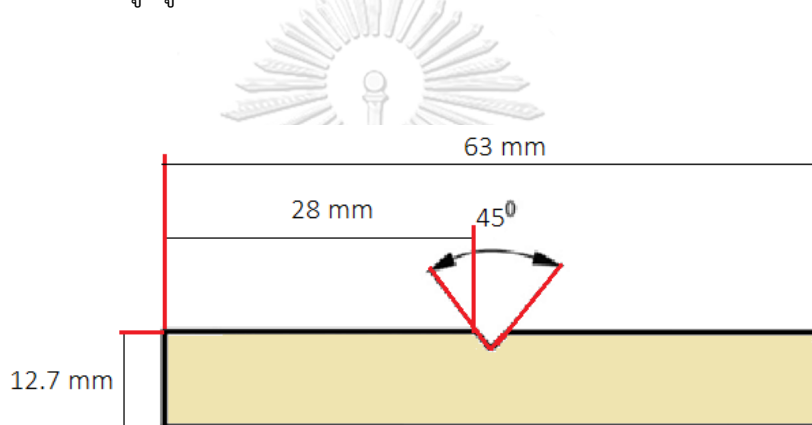
การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซต ตามมาตรฐาน ASTM D790 ความกว้างของชิ้นงาน 12.7 มิลลิเมตร ความยาว 127 มิลลิเมตร และความหนา 3 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 3.4) จากเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) load cell ขนาด 5000 นิวตัน ความเร็วในการกด (test speed) 6.4 มิลลิเมตรต่อนาที ติดตั้งหัวกดและฐานรองชิ้นงานเป็นแบบการทดสอบแรงดัดแบบ 3 จุด (3 point bending test) โดยทดสอบชิ้นงานซ้ำอย่างน้อย 5 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.4 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดัดแบบ 3 จุด

### 3.5.3 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก (impact strength)

การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกหรือค่าพลังงานที่สามารถดูดซับได้ก่อนเกิดการแตกหักของ เทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์และเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต ด้วยเครื่องทดสอบ Izod Impact Tester ตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยความกว้างของชิ้นงาน 12.7 มิลลิเมตร ความยาว 63 มิลลิเมตร และความหนา 3 มิลลิเมตร และมีรอยบากตรงกลางชิ้นงานเป็นมุม  $45^{\circ}$  ความลึก 0.25 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 3.5) และใช้ลูกตุ้มเบอร์ 2 ขนาด 2.75 จูลล์ โดยวางชิ้นงานในแนวตั้ง จากนั้นปล่อยลูกตุ้มให้ลงมากระทบชิ้นงานพลังงานจากลูกตุ้มจะถูกชิ้นงานดูดซับเอาไว้อ่านค่ามูมองศาแล้วคำนวณหาค่าพลังงานที่ถูกดูดซับ โดยทดสอบชิ้นงานซ้ำอย่างน้อย 5 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ย

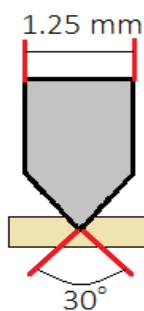


รูปที่ 3.5 ขนาดชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 3.5.4 การทดสอบสมบัติความแข็งแบบร็อคเวลล์ (rockwell hardness)

การทดสอบสมบัติความแข็งแบบร็อคเวลล์ของเทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์และเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต ตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยใช้ Durometer แบบ Shore D (ดังรูปที่ 3.6) ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบมีความหนาประมาณ 6 มิลลิเมตร กดให้แป้นของเครื่องทดสอบสัมผัสกับหน้าชิ้นงานทำการวัด 5 จุด ใช้ค่ากลางของข้อมูล เป็นความแข็งของตัวอย่างที่ทดสอบ



รูปที่ 3.6 ขนาดชิ้นงานทดสอบสมบัติความแข็ง

3.5.5 การทดสอบการสลายตัวด้วยความร้อนด้วยเทคนิค thermogravimetric analysis (TGA) การทดสอบการสลายตัวด้วยความร้อนศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเทอร์มอพลาสติก อีลาสโตเมอร์และเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต เมื่อได้รับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ด้วยเครื่อง TGA (ดังรูป 3.7) ที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30 องศาเซลเซียส ถึง 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้น อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ไหลผ่านด้วยอัตราเร็ว 20 มิลลิลิตร ต่อนาที



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน

### 3.5.6 การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค differential scanning calorimetry (DSC)

ศึกษาอุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ), อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ) และ อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization,  $T_{cc}$ ) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซต ในช่วงอุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องมือ differential scanning calorimeter (ดังรูป 3.8) ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วยภาวการณ์ทดสอบดังนี้

3.5.6.1 เริ่มอุณหภูมิทดสอบที่ 25 องศาเซลเซียสจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วให้คงไว้ 5 นาที

3.5.6.2 ลดอุณหภูมิจาก 200 องศาเซลเซียสจนถึง -80 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วให้คงไว้ 2 นาที

3.5.6.3 เพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งจาก -80 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วให้คงไว้ 5 นาที และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณร้อยละผลึก ดังสมการที่ 3.1

$$X = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{ref}} \times 100\%$$

สมการ 3.1

โดย

$X$

คือ

ค่าร้อยละผลึก

$\Delta H_{ref}$

คือ

ค่าเอนทาลปีของ PP ( 77.83 J/g) [21]



รูปที่ 3.8 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลแคลอริมิเตอร์

### 3.5.7 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์และเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) (ดังรูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทกแซในไนโตรเจนเหลวแล้วหักเพื่อให้ได้ผิวทดสอบใหม่ จากนั้นทำการสกัดวัฏภาคของยางออกโดยแช่ในโทลูอีนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 วัน ทิ้งไว้จนแห้ง จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบมาเคลือบทองคำโดยนำตัวอย่างวางในเครื่องเคลือบทองคำภายใต้สุญญากาศ (ดังรูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.10 เครื่องเคลือบทองคำภายใต้สุญญากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 3.5.8 การทดสอบหาเวลาการคงรูป (cure time)

นำยางคอมพาวด์มาตัดเป็นชิ้นงานทดสอบวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 เซนติเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร เพื่อใช้ทดสอบหาเวลาในการคงรูปยางด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

### 3.5.9 วิเคราะห์ดรรชนีการหลอมไหล (MFI)

ทำการทดสอบหาค่าดรรชนีการหลอมไหลของ rPP, TPEs และ TPVs ด้วยเครื่องทดสอบดรรชนีการหลอมไหล (รูปที่ 3.11) โดยใช้สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ด้วยน้ำหนัก 2.16 กิโลกรัม จากนั้นคำนวณและบันทึกผลในหน่วย กรัม/10นาที ตามมาตรฐาน ASTM D1238



รูปที่ 3.11 เครื่องวัดดรรชนีการหลอมไหล  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

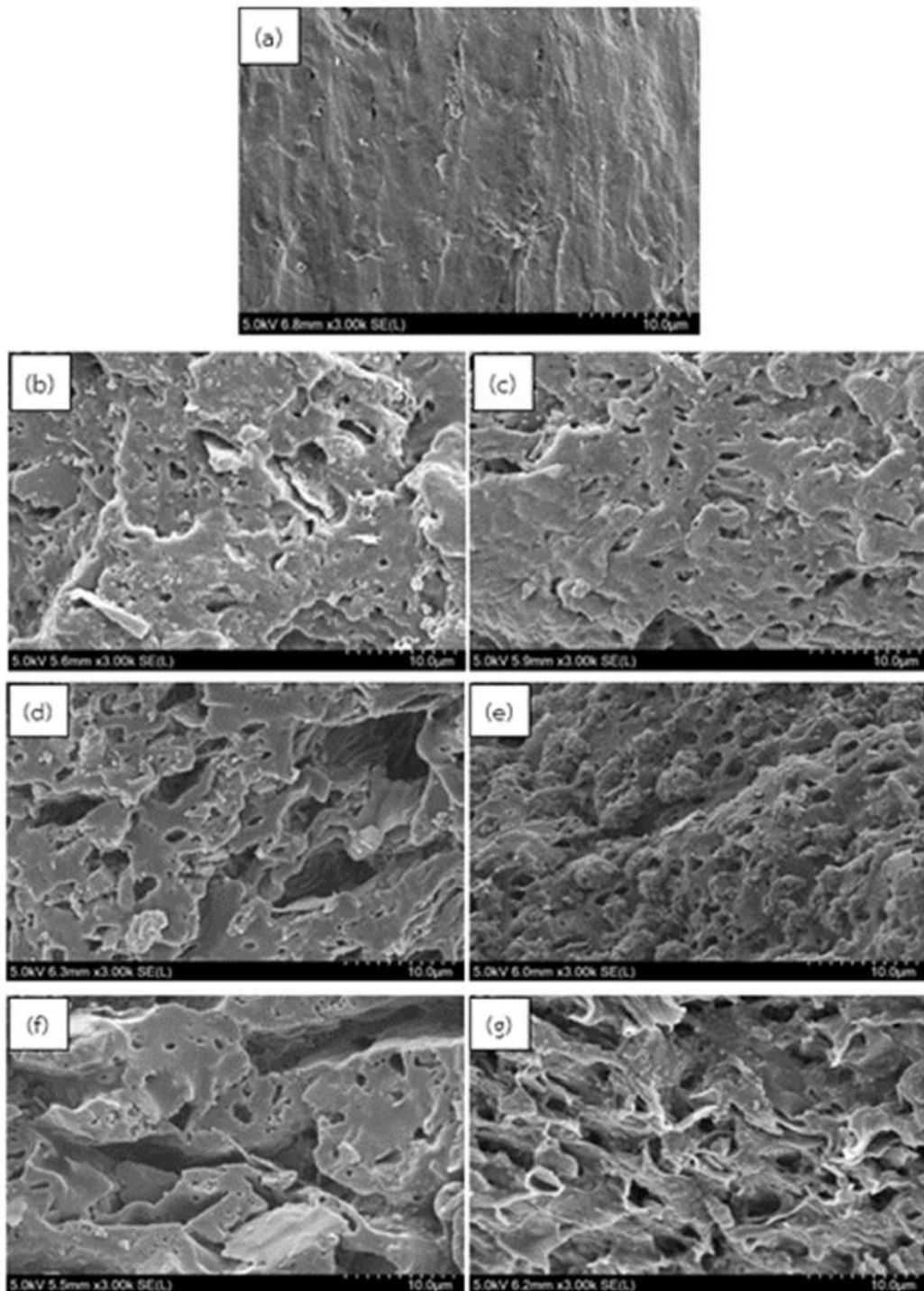
#### 4.1 สัณฐานวิทยา (morphology)

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานจากการทดสอบความทนต่อแรงกระแทกของ rPP, TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, และ 70/30 รวมถึง TPVs ที่อัตราส่วน 80/20 โดยเติมปริมาณ DCP 1 และ 2 phr จากนั้นทำการสกัดวัฏภาคของยางออกโดยการแช่โทลูอีนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 วัน ทิ้งไว้จนแห้ง ซึ่งตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายใต้กำลังขยาย 3,000 เท่า

จากการสังเกตพื้นผิวบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทกพบว่า ชิ้นงาน rPP มีรอยแตกหักแบบพื้นผิวเรียบ (รูปที่ 4.1(a)) เมื่อทำการเตรียมเป็น TPEs จาก rPP/STR 5L และ rPP/EPDM พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยางที่มากขึ้นพื้นผิวของชิ้นงานที่แตกหักจะมีความไม่เรียบและขรุขระมากขึ้นตามปริมาณของยางและมีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นแบบวัฏภาคร่วมกัน (continuous phase) ซึ่งแสดงถึงลักษณะการผสมของพอลิเมอร์ผสม TPEs (รูปที่ 4.1(b-g)) และเมื่อพิจารณาที่ชนิดของยาง STR 5L พบว่ามีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอโดยมีการรวมตัวของเฟสเนื่องจากขั้นตอนสกัดวัฏภาคของยางออกทำให้เห็นถึงโพรงขนาดใหญ่ ซึ่งบ่งบอกถึงการรวมตัวและการกระจายตัวที่ไม่ดี ขณะที่ rPP/EPDM จะเห็นได้ว่าโพรงที่ปรากฏมีขนาดเล็กกว่าเนื่องจาก rPP มีความเข้ากันได้ดีกับ EPDM มากกว่า STR 5L บ่งบอกถึงการกระจายตัวที่ดีกว่า โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้สัดส่วนพอลิเมอร์ต่อยางที่ 80/20 มาทำการเติมเพอร์ออกไซด์เพื่อทำเป็นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซตเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม

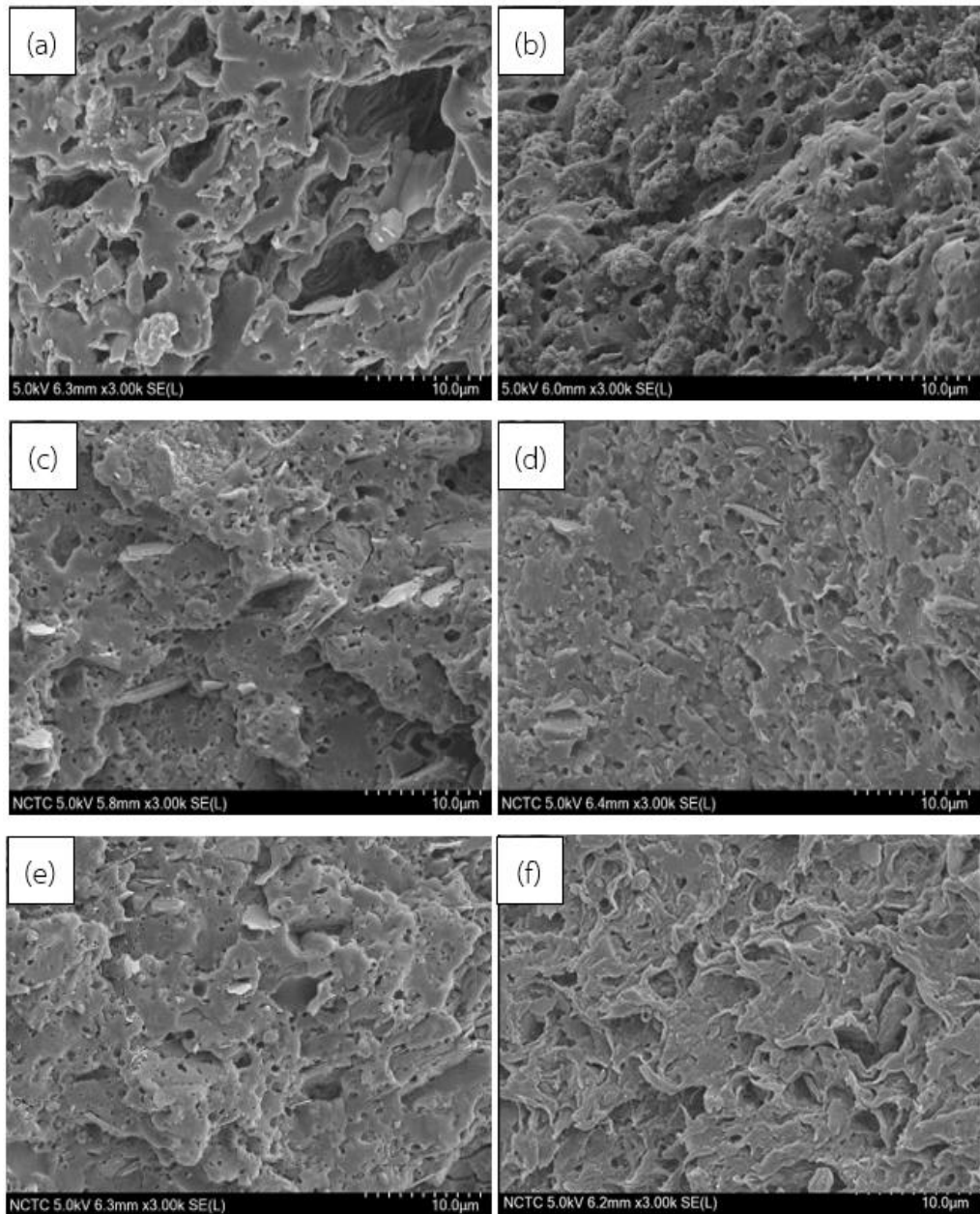


4.1.1 สัณฐานวิทยาของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาของ rPP (a), rPP/STR 5L ที่อัตราส่วน 90/10 (b), 80/20 (d) และ 70/30 (f) และ rPP/EPDM ที่อัตราส่วน 90/10 (c), 80/20 (e) และ 70/30 (g)

4.1.2 สัณฐานวิทยาของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ 80/20 rPP/EPDM DCP ที่ ปริมาณ 0, 1 และ 2 phr

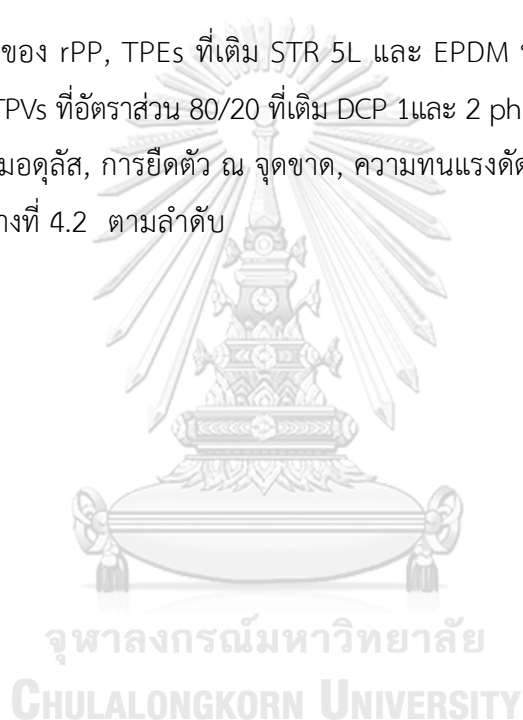


รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของ TPVs rPP/STR 5L ที่เติม DCP 0 (a), 1 (c) และ 2 (e) phr และ rPP/EPDM ที่เติม DCP 0 (b), 1 (d) และ 2 (f) phr

จากการสังเกตพื้นผิวบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทกพบว่า TPEs จาก rPP/STR 5L และ TPEs จาก rPP/EPDM ที่อัตราส่วน 80/20 (รูปที่ 4.2(a-b)) เฟสของยาง (โพรงบนพื้นผิว) มีขนาดใหญ่และมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ และเมื่อทำการเติม DCP ที่ปริมาณ 1 และ 2 phr พบว่าเฟสของยางเกิดการแตกตัวออกกระจายไปทั่วเฟสของพลาสติกซึ่งที่เกิดเป็นวัฏภาคกระจายในเนื้อของ rPP เกิดจากการเชื่อมขวางของยางและแรงเฉือนในการผสมซึ่งแสดงถึงลักษณะสัณฐานวิทยาของ TPVs

#### 4.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ (mechanical properties)

สมบัติเชิงกลของ rPP, TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 รวมถึง TPVs ที่อัตราส่วน 80/20 ที่เติม DCP 1 และ 2 phr ได้แก่ ความทนแรงกระแทก, ความทนแรงดึง, ย้งสัมมอดูลัส, การยืดตัว ณ จุดขาด, ความทนแรงดัดโค้ง และความแข็ง แสดงดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ



ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ความหนาแน่นกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	ความทนแรงดึง (MPa)	ยังสมบูรณ์สุด (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	ความทนแรงดึงตัดโค้ง (MPa)	ความแข็ง (Shore D)
rPP	7.7 ± 0.8	14.8 ± 0.3	787.8 ± 86.5	6.8 ± 1.2	19.8 ± 1.1	46.6 ± 1.1
rPP / STR 5L						
90 / 10	27.2 ± 1.9	12.0 ± 0.4	572.6 ± 32.9	10.1 ± 1.7	13.9 ± 0.6	39.2 ± 0.8
80 / 20	34.3 ± 1.5	8.9 ± 0.1	399.8 ± 29.0	11.4 ± 0.8	10.7 ± 0.4	35.8 ± 0.8
70 / 30	39.8 ± 1.2	6.3 ± 0.5	254.6 ± 21.3	14.0 ± 2.2	7.2 ± 0.1	30.8 ± 0.4
rPP / EPDM						
90 / 10	32.1 ± 3.0	12.2 ± 0.1	658.7 ± 69.2	6.6 ± 1.9	15.3 ± 0.6	39.2 ± 0.8
80 / 20	37.4 ± 3.1	9.3 ± 0.3	441.1 ± 38.0	7.5 ± 1.4	12.5 ± 0.9	34.6 ± 0.5
70 / 30	42.8 ± 1.2	7.4 ± 0.3	332.75 ± 24.0	8.1 ± 1.0	7.6 ± 0.1	32.6 ± 0.5

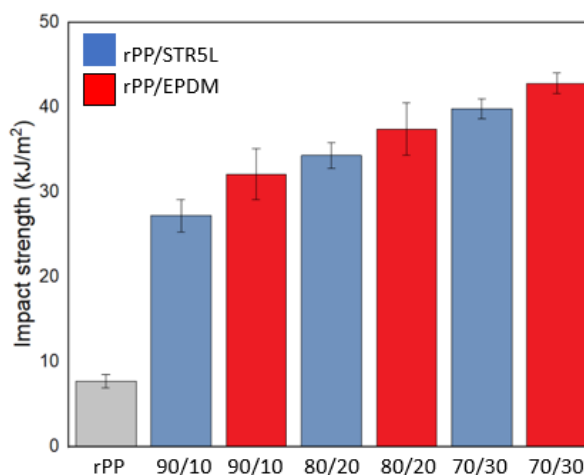
ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ปริมาณต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ปริมาณ DCP (phr)	ความทนแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	ความทนแรงดึง (MPa)	ยังสมมูล (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	ความทนแรงตัดได้ (MPa)	ความแข็ง (Shore D)
rPP / STR 5L							
80 / 20	0	34.3 ± 1.5	8.9 ± 0.1	399.8 ± 29.0	11.4 ± 0.8	10.7 ± 0.4	35.8 ± 0.8
80 / 20	1	28.3 ± 3.3	6.3 ± 0.7	472.0 ± 7.8	4.5 ± 1.0	8.2 ± 0.2	35.4 ± 0.7
80 / 20	2	10.3 ± 2.5	5.3 ± 0.4	469.7 ± 15.5	2.7 ± 0.5	7.5 ± 0.4	36.0 ± 0.7
rPP / EPDM							
80 / 20	0	37.4 ± 3.1	9.3 ± 0.3	441.1 ± 38.0	7.5 ± 1.4	12.5 ± 0.9	34.6 ± 0.5
80 / 20	1	44.7 ± 1.5	7.1 ± 0.3	485.6 ± 14.1	5.2 ± 0.9	8.4 ± 0.2	35.0 ± 0.4
80 / 20	2	35.7 ± 1.4	6.9 ± 0.1	473.3 ± 7.5	4.9 ± 1.1	8.0 ± 0.2	36.0 ± 0.8

#### 4.2.1 สมบัติเชิงกลของ rPP และ TPEs

##### 4.2.1.1 สมบัติความทนแรงกระแทก (impact strength)

รูปที่ 4.3 แสดงความทนแรงกระแทกของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ



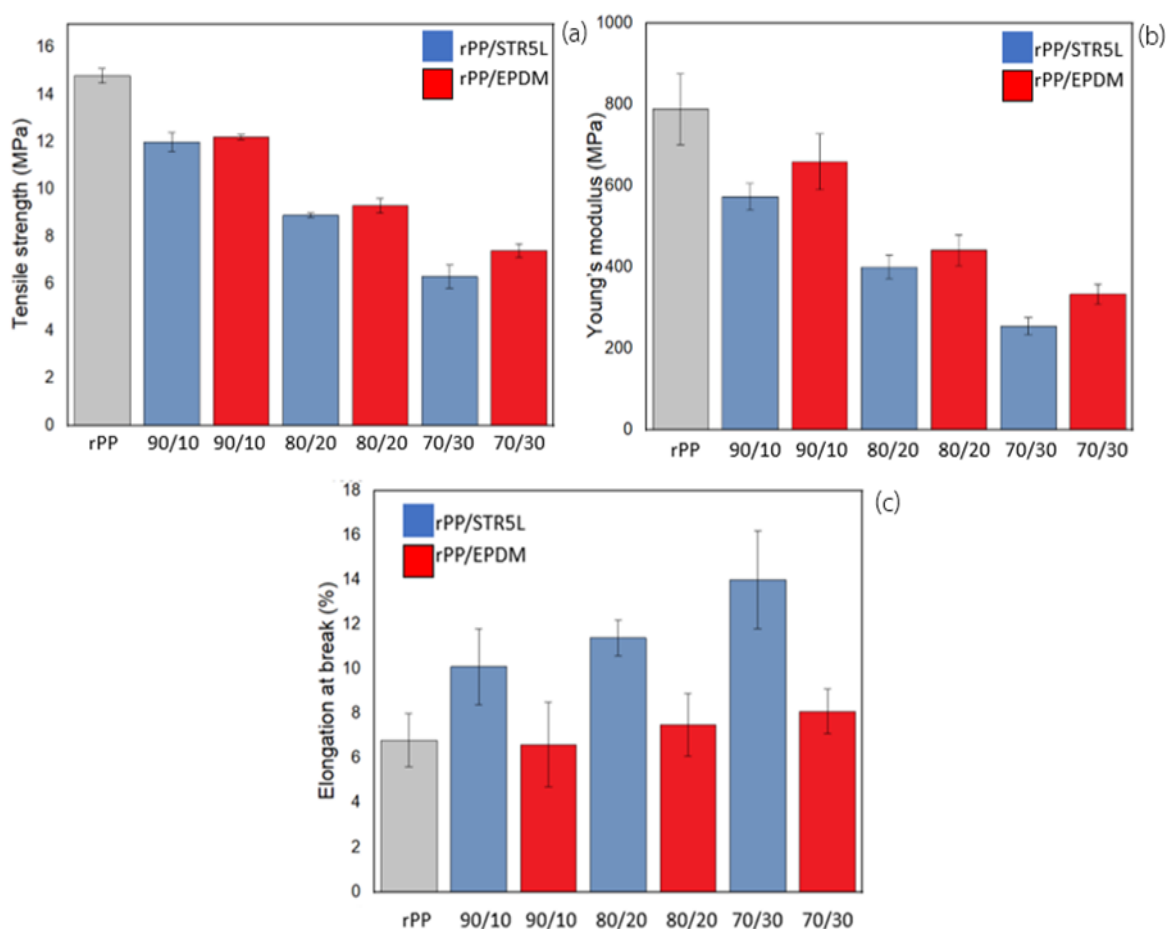
รูปที่ 4.3 ความทนแรงกระแทกของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30

จากตาราง 4.1 และรูปที่ 4.3 พบว่า rPP มีค่าความทนต่อแรงกระแทกต่ำ ( $7.7 \text{ kJ/m}^2$ ) แสดงพฤติกรรมเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเปราะ จึงมีการปรับปรุงเพื่อเพิ่มสมบัติความทนแรงกระแทกด้วยการเตรียมเป็น TPEs ด้วย STR 5L และ EPDM พบว่าการเติมอย่างส่งผลให้ TPEs มีความทนแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น การผสมยางในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักช่วยปรับปรุงให้ TPEs มีความทนแรงกระแทกสูงขึ้นตามปริมาณยางที่เพิ่มขึ้น โดยการผสมยาง STR 5L และยาง EPDM ที่ปริมาณร้อยละ 30 ส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มสูงถึง  $39.8 \text{ kJ/m}^2$  และ  $42.2 \text{ kJ/m}^2$  ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) เป็นผลมาจาก TPEs ที่เตรียมมีความเหนียวและอ่อนตัวเพิ่มขึ้นจากการเติมยาง STR 5L และ ยาง EPDM เมื่อได้รับแรงกระแทกแรงดังกล่าวจะส่งผ่านจากวัสดุของ rPP ไปยังวัสดุของยาง STR 5L และ EPDM จึงสามารถช่วยดูดซับแรงกระแทกของ TPEs ส่งผลให้แตกหักยากขึ้น และเมื่อพิจารณา TPEs ระหว่างการเติมยาง STR 5L และยาง EPDM ที่อัตราส่วนเท่ากัน พบว่า rPP/EPDM มีแนวโน้มของค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่า rPP/STR 5L เนื่องจาก

rPP/EPDM มีการกระจายตัวที่ดีกว่า ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับภาพสัณฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในหัวข้อ 4.1.1

#### 4.2.1.2 สมบัติความทนแรงดึง (tensile properties)

รูปที่ 4.4 แสดงความทนแรงดึง (a), ยั่งสัมมอดุลัส (b), การยืดตัว ณ จุดขาด (c) ของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 4.4 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งสัมมอดุลัส, การยืดตัว ณ จุดขาด (c) ของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30

จากตาราง 4.1 และรูปที่ 4.4 (a) พบว่า rPP มีค่าความทนแรงดึงสูง (14.8 MPa) เมื่อทำการเตรียมเป็น TPEs ด้วย STR 5L และ EPDM พบว่าการเติมยางส่งผลให้ TPEs มีความทนต่อแรงดึงลดต่ำลง ซึ่งการผสมยางในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักจะส่งผลทำให้ TPEs มีความทน

แรงดึงลดลงตามปริมาณสัดส่วนของยางที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากยางเป็นวัสดุที่มีความทนแรงดึงต่ำกว่า rPP และเมื่อพิจารณาที่ชนิดของยางพบว่า EPDM มีค่าความทนแรงดึงสูงกว่า STR 5L เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีกว่า

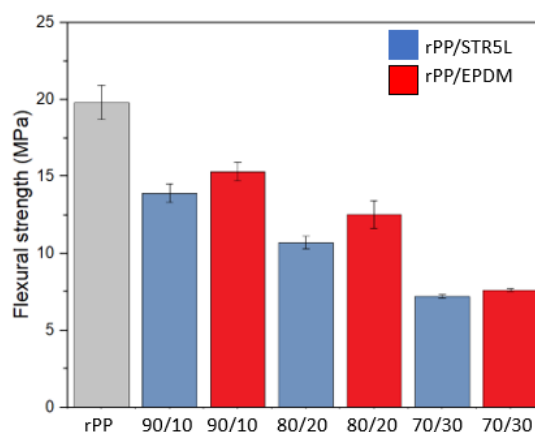
จากตาราง 4.1 และรูปที่ 4.4 (b) พบว่า rPP มีค่ายังสัมดูล์สูง (787.8 MPa) เมื่อทำการเตรียมเป็น TPEs ด้วย STR 5L และ EPDM พบว่าการเติมยางส่งผลให้ TPEs มีค่ายังสัมดูล์ลดลง ซึ่งการผสมยางในปริมาณร้อยละ 10, 20, และ 30 โดยน้ำหนักจะส่งผลทำให้ TPEs มีค่ายังสัมดูล์ลดลงตามปริมาณสัดส่วนของยางที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา TPEs ระหว่างยาง STR 5L และยาง EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า rPP/EPDM มีแนวโน้มของค่ายังสัมดูล์สูงกว่า rPP/STR 5L เนื่องจาก rPP/EPDM มีความเข้ากันได้และการกระจายตัวที่ดีกว่า rPP/STR 5L

จากตาราง 4.1 และรูปที่ 4.4 (c) พบว่า rPP มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำ (6.8 %) เมื่อทำการเตรียมเป็น TPEs ด้วย STR 5L และ EPDM พบว่าการเติมยางส่งผลให้ TPEs มีการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการผสมยางในปริมาณร้อยละ 10, 20, และ 30 โดยน้ำหนักจะส่งผลทำให้ TPEs มีการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของยางที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากยางเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น เมื่อพิจารณา TPEs ระหว่างยาง STR 5L และยาง EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า rPP/STR 5L มีแนวโน้มของค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่า rPP/EPDM เนื่องจากยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง



#### 4.2.1.3 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength)

รูปที่ 4.5 แสดงความทนแรงดัดโค้งของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

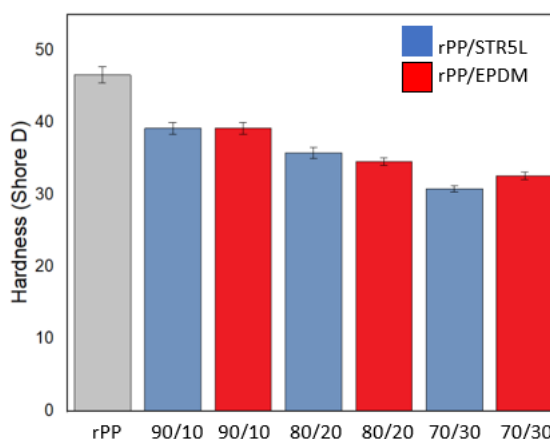


รูปที่ 4.5 ความทนแรงดัดโค้งของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30

จากตาราง 4.1 และรูปที่ 4.5 พบว่า rPP มีค่าความทนแรงดัดโค้งที่สูง (19.8 MPa) เนื่องจาก rPP เป็นพลาสติกที่มีความแข็งแรง เมื่อทำการเตรียมเป็น TPEs จาก STR 5L และ EPDM พบว่าการเติมยางส่งผลให้ TPEs มีความทนแรงดัดโค้งลดลง และการผสมยางในปริมาณร้อยละ 10, 20, และ 30 โดยน้ำหนักจะส่งผลทำให้ TPEs มีความทนแรงดัดโค้งลดลงตามปริมาณสัดส่วนของยางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากยางเป็นวัสดุที่ยืดหยุ่นและอ่อนนิ่มจึงส่งผลให้ TPEs สามารถดัดโค้งได้ง่ายขึ้น เมื่อพิจารณา TPEs ผสมระหว่างยาง STR 5L และยาง EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า rPP/EPDM มีแนวโน้มของค่าความทนแรงดัดโค้งสูงกว่า rPP/STR 5L เนื่องจาก rPP/EPDM มีความเข้ากันได้และการกระจายตัวที่ดีกว่า rPP/STR 5L โดยผลการทดสอบยังสอดคล้องกับค่าความทนต่อแรงดึงและยังสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้น

#### 4.2.1.4 ความแข็งแบบร็อคเวลล์ (rockwell hardness)

รูปที่ 4.6 แสดงความแข็งแบบร็อคเวลล์ของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ



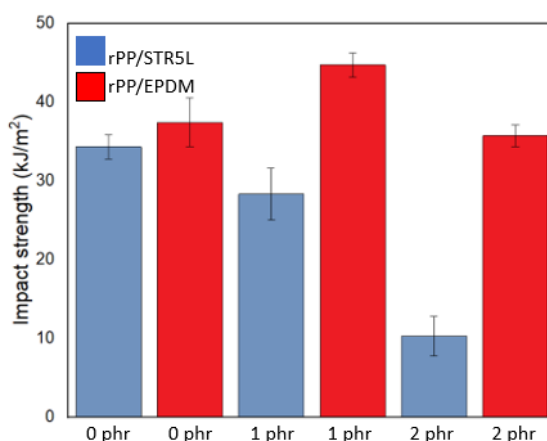
รูปที่ 4.6 ความแข็งแบบร็อคเวลล์ ของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30

จากตาราง 4.1 และรูปที่ 4.6 พบว่า rPP มีความแข็งแบบร็อคเวลล์ที่ (19.8 MPa) เนื่องจาก rPP เป็นพลาสติกที่มีความแข็ง เมื่อทำการเตรียมเป็น TPEs จาก STR 5L และ EPDM พบว่าการเติมยางส่งผลให้ TPEs มีความแข็งแบบร็อคเวลล์ลดลง และการผสมยางในปริมาณร้อยละ 10, 20, และ 30 โดยน้ำหนักจะส่งผลทำให้ TPEs มีความแข็งแบบร็อคเวลล์ลดลงตามปริมาณสัดส่วนของยางที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากยางเป็นวัสดุที่อ่อนนิ่มจึงส่งผลให้ TPEs มีค่าแข็งแบบร็อคเวลล์ลดลง และเมื่อพิจารณา TPEs ระหว่างยาง STR 5L และยาง EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ของ TPEs ทุกอัตราส่วนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญอาจเพราะการทดสอบความแข็งเป็นการทดสอบบนพื้นผิวหน้าของชิ้นทดสอบ

4.2.2 สมบัติเชิงกลของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ปริมาณต่าง ๆ

4.2.2.1 สมบัติความทนแรงกระแทก (impact strength)

รูปที่ 4.7 แสดงความทนแรงกระแทกของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ปริมาณต่าง ๆ

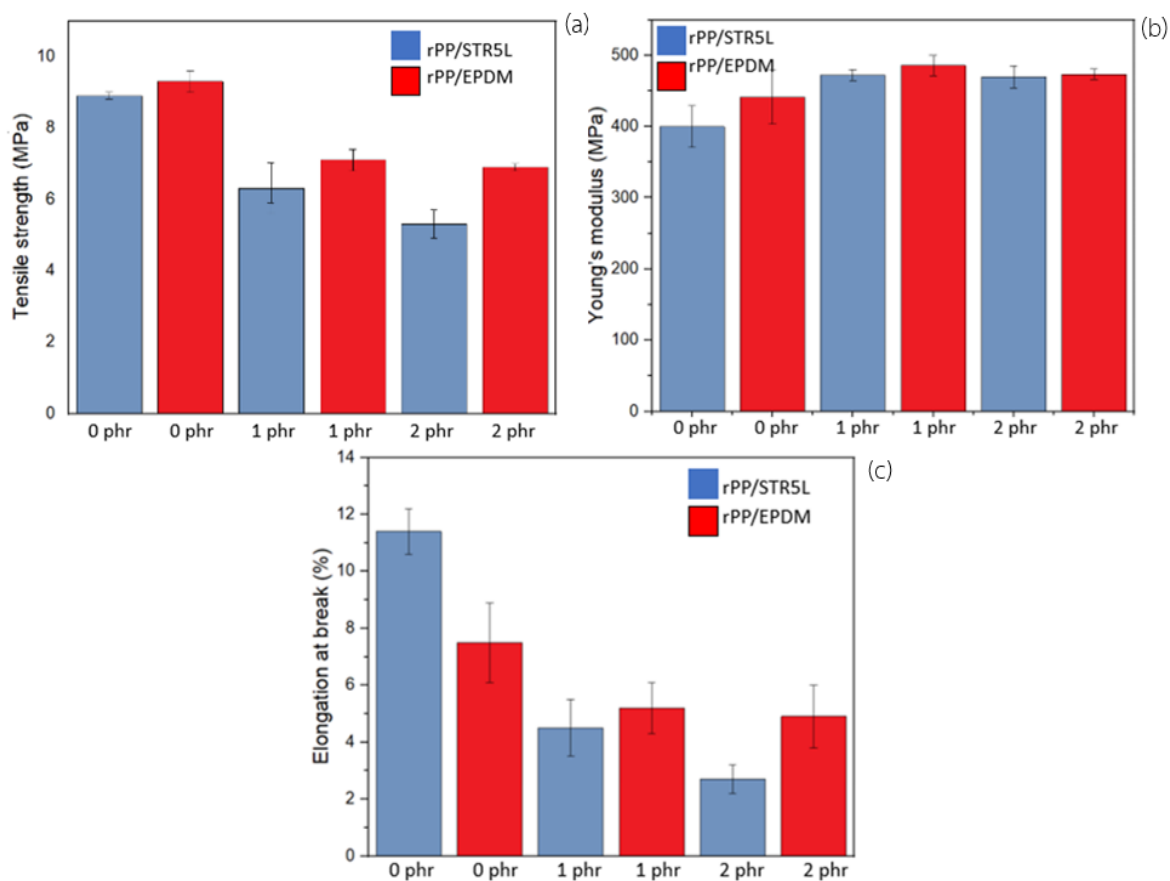


รูปที่ 4.7 ความทนแรงกระแทกของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ปริมาณ 0, 1 และ 2 phr

จากตาราง 4.2 และรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณา TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ 80/20 rPP/EPDM โดยมีการเติมปริมาณ DCP ที่ปริมาณ 0, 1 และ 2 phr พบว่าการเติม DCP ส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกลดต่ำลงซึ่งอาจมีผลมาจากการตัดขาดสายโซ่ ซึ่งอาจเกิดจาก DCP ทำให้ rPP เสื่อมสภาพเนื่องจากเกิดพันธะคู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอน (beta scission) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง TPVs ที่เติม EPDM และ STR 5L พบว่า TPVs จาก rPP/EPDM มีค่าความทนแรงกระแทกมากกว่า ( 47.7 kJ/m<sup>2</sup> และ 35.7 kJ/m<sup>2</sup>) TPVs จาก STR 5L ( 28.3 kJ/m<sup>2</sup> และ 10.3 kJ/m<sup>2</sup>) เนื่องจากมีการกระจายตัวที่ดีกว่าและยังเกิดการเชื่อมขวางมากกว่าส่งผลให้ยาง EPDM มีความทนแรงกระแทกมากขึ้น ขณะที่ rPP/STR 5L อาจเกิดการตัดสายโซ่ที่มากกว่าส่งผลให้มีความทนแรงกระแทกน้อยกว่า และการเติม DCP ที่ปริมาณ 1 phr จะมีค่าความทนแรงกระแทกมากกว่าปริมาณ DCP 2 phr เนื่องจากการเติม DCP มากขึ้นส่งผลให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่ rPP มากขึ้น

#### 4.2.2.2 สมบัติความทนแรงดึง (tensile properties)

รูปที่ 4.8 แสดงความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยังส์มอดุลัส, (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนต่อแรงดึง, (b) ยังส์มอดุลัส, การยืดตัว ณ จุดขาด (c) ของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ปริมาณ 0, 1 และ 2 phr

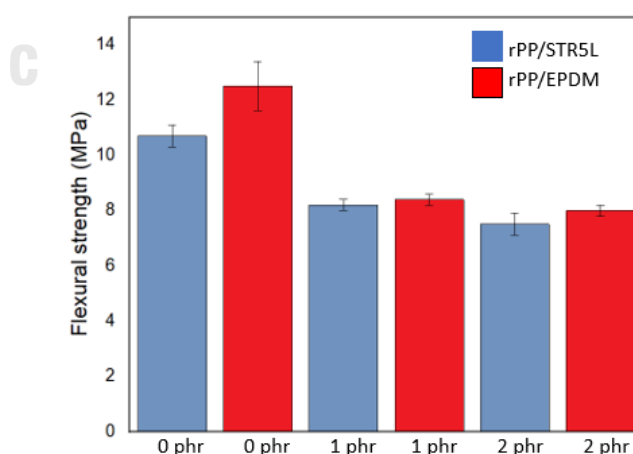
จากตาราง 4.2 และรูปที่ 4.8 (a) เมื่อพิจารณา TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM พบว่าการเติม DCP ส่งผลทำให้ค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากอาจเกิดการตัดขาดของสายโซ่ rPP และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่าง TPVs จาก rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP 1 และ 2 phr พบว่า TPVs จาก rPP/EPDM มีค่าความทนแรงดึงมากกว่า ( 7.1 MPa และ 6.9 MPa) TPVs จาก STR 5L ( 6.3 MPa และ 5.3 MPa ) เนื่องจากความเข้ากันได้และการกระจายตัวที่ดีกว่า

จากตาราง 4.2 และรูปที่ 4.8 (b) เมื่อพิจารณา TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM DCP ที่ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr พบว่าการเติม DCP ส่งผลทำให้ค่ายังสัมมอดูล์สมิแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากยางเกิดการกระจายตัวไปทั่วภูมิภาคของพลาสติกด้วยแรงเฉือนในระหว่างผสมและยางเกิดการเชื่อมขวางส่งผลทำให้ TPVs แข็งขึ้นและมีค่ายังสัมมอดูล์สมิของยังเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr พบว่าการเติม DCP ที่ 1 phr จะส่งผลทำให้ TPVs จาก rPP/STR 5L และ จาก rPP/EPDM มีค่ายังสัมมอดูล์สมิสูงสุด ( 469.7 MPa และ 485.6 MPa ตามลำดับ) เนื่องจากการเติม DCP ที่ปริมาณ 2 phr อาจทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่ rPP และเมื่อพิจารณาระหว่างยางทั้งสองชนิดพบว่า EPDM มีค่ายังสัมมอดูล์สมิสูงกว่า STR 5L เนื่องจากมีการกระจายตัวที่ดีกว่าและมีกว่าเชื่อมขวางที่มากกว่า

จากตาราง 4.2 และรูปที่ 4.8 (c) เมื่อพิจารณา TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM DCP ที่ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr พบว่าการเติม DCP ส่งผลทำให้ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดลดต่ำลงซึ่งอาจมีผลมาจากการตัดขาดสายโซ่ของ rPP และเมื่อพิจารณา TPVs ระหว่างยาง STR 5L และยาง EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า rPP/EPDM มีแนวโน้มของค่าการยึดตัว ณ จุดขาดสูงกว่า rPP/STR 5L อาจเนื่องมาจากการกระจายตัวของยางและการเชื่อมขวางที่มากกว่า

#### 4.2.2.3 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength)

รูปที่ 4.9 แสดงความทนแรงดัดโค้งของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ปริมาณต่าง ๆ

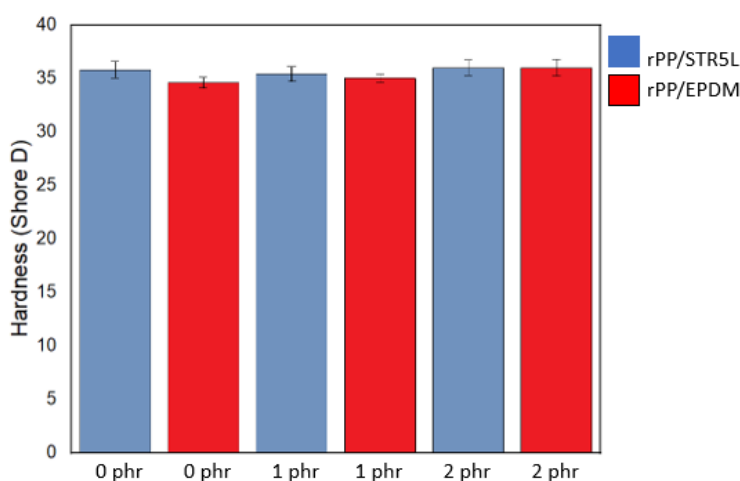


รูปที่ 4.9 ความทนแรงดัดโค้งของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ปริมาณ 0, 1 และ 2 phr

จากตาราง 4.2 และรูปที่ 4.9 พบว่า TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM DCP ที่ ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr พบว่าการเติม DCP ส่งผลทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอาจมีผลมาจากการตัดขาดสายโซ่ของ rPP และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่าง TPVs จาก ยาง EPDM และ จากยาง STR 5L ที่เติม DCP 1 และ 2 phr พบว่า TPVs จาก rPP/EPDM มีจะมีค่า ความทนแรงดัดโค้งมากกว่า ( 8.4 MPa และ 8.0 MPa ) TPVs จาก STR 5L ( 8.2 MPa และ 7.5 MPa ) เนื่องจากความเข้ากันได้

#### 4.2.2.4 ความแข็งแบบร็อคเวลล์ (rockwell hardness)

รูปที่ 4.10 แสดงความแข็งแบบร็อคเวลล์ของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.10 ความแข็งแบบร็อคเวลล์ ของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM ที่เติม DCP ที่ปริมาณ 0, 1 และ 2 phr

จากตาราง 4.2 และรูปที่ 4.10 พบว่า TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM DCP ที่ ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr พบว่าการเติม DCP ในปริมาณที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแบบ ร็อคเวลล์ของ TPVs อย่างมีนัยสำคัญ

### 4.3 สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบ (thermal properties)

สมบัติทางความร้อนของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 รวมถึง TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM DCP ที่ปริมาณ 0, 1 และ 2 phr

#### 4.3.1 เสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability)

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของ rPP, TPEs และ TPVs ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยประกอบด้วยอุณหภูมิเริ่มสลายตัว ( $T_{onset}$ ), อุณหภูมิการสลายตัว ( $T_{max}$ ), อุณหภูมิสิ้นสุดสลายตัว ( $T_{endset}$ ), และปริมาณเถ้า (char) ที่เหลืออยู่ ณ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

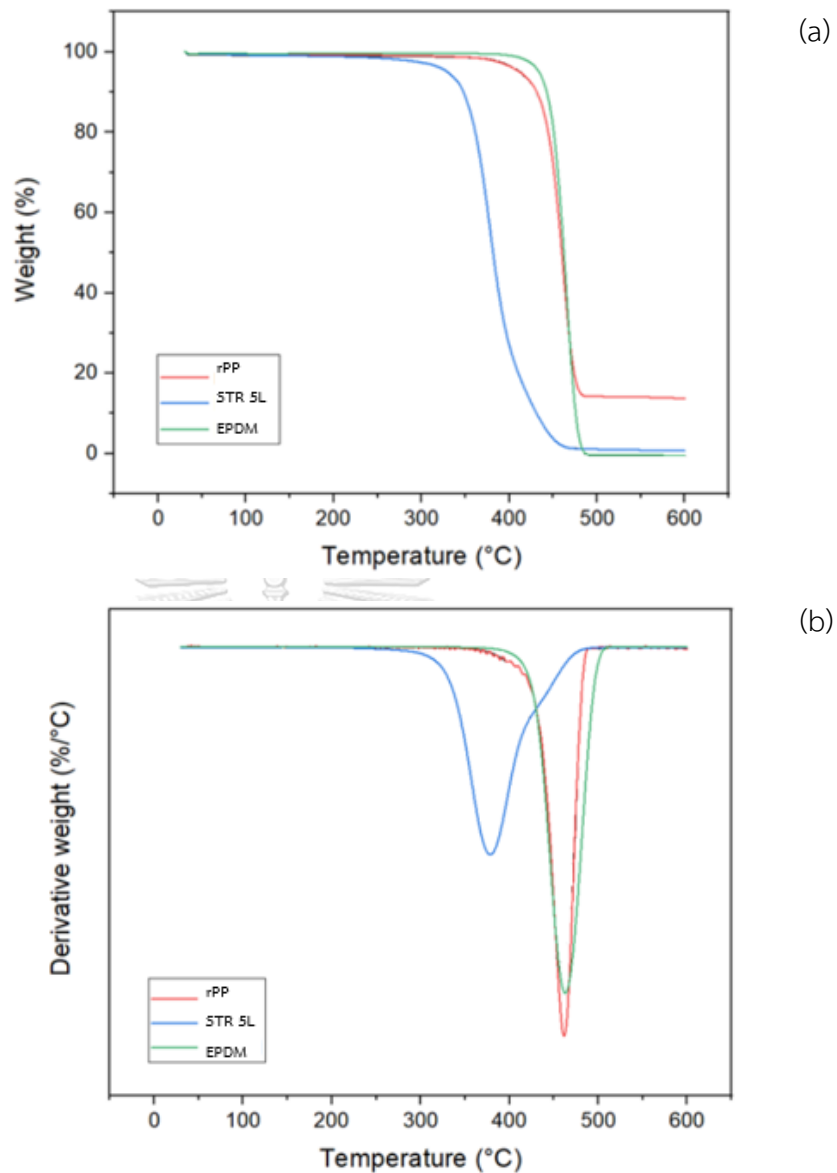


ตารางที่ 4.3 เสถียรภาพทางความร้อนของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 รวมถึง TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM DCP ที่ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr

Sample	T <sub>onset</sub> (°C)	T <sub>endset</sub> (°C)	T <sub>max2</sub> (°C)	T <sub>max1</sub> (°C)	Char (%)
rPP	444.4	476.0	464.0	-	14.1
STR 5L	333.6	429.9	378.5	-	0.1
EPDM	428.3	496.0	436.0	-	0.4
<b>rPP/STR 5L (wt%/w%)</b>					
90/10	433.2	476.3	462.0	370.5	11.6
80/20	419.7	476.3	456.8	370.5	16.7
70/30	409.0	478.8	456.6	370.8	9.6
<b>rPP/EPDM (wt%/w%)</b>					
90/10	449.0	477.3	466.3	-	12.7
80/20	448.0	477.1	461.0	-	12.9
70/30	449.8	477.6	461.8	-	9.1
<b>rPP/STR 5L/DCP (wt%/w%/phr)</b>					
80/20/1	416.0	473.5	453.5	369.8	9.3
80/20/2	423.9	475.6	457.0	372.6	11.9
<b>rPP/EPDM/DCP (wt%/w%/phr)</b>					
80/20/1	439.8	475.2	459.9	-	11.9
80/20/2	445.8	477.1	461.0	-	10.8

จากรูปที่ 4.11, รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 แสดง TGA เทอร์โมแกรม (a) และ DTG เทอร์โมแกรม (b) ของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 รวมถึง TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM DCP ที่ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr ตามลำดับ

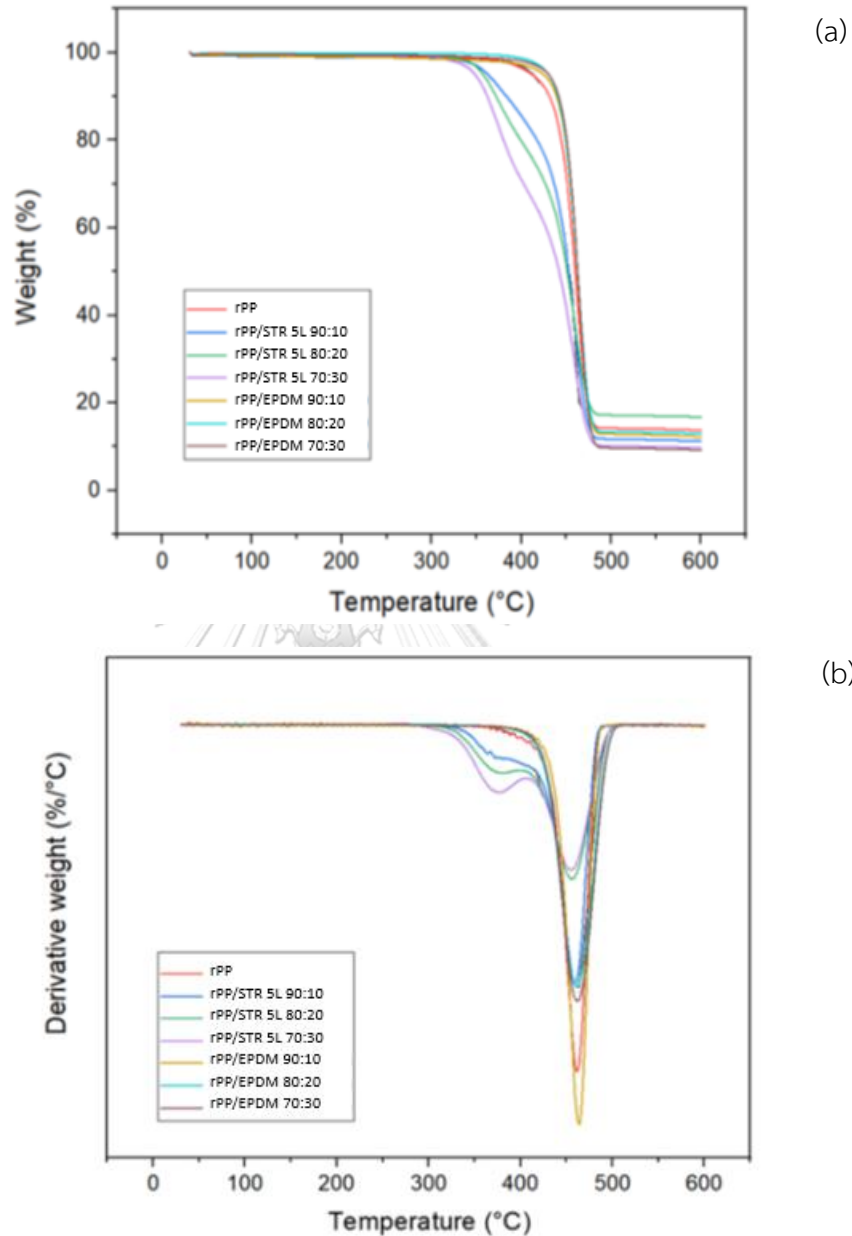




รูปที่ 4.11 (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ rPP, STR 5L, และ EPDM

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.11(a) และ (b) พบว่า rPP มีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 444.4 - 476.0 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิสลายตัวสูงสุด 1 ชั้น เป็นการสลายตัวของพอลิเมอร์ในสายโซ่หลักที่ประมาณ 464.0 องศาเซลเซียส ในขณะที่ STR 5L มีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 333.6 - 429.9 องศาเซลเซียส โดยเป็นการสลายตัวของพอลิเมอร์ในสายโซ่หลักที่ประมาณ 378.5 องศาเซลเซียส และ EPDM มีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 428.3 - 496.0

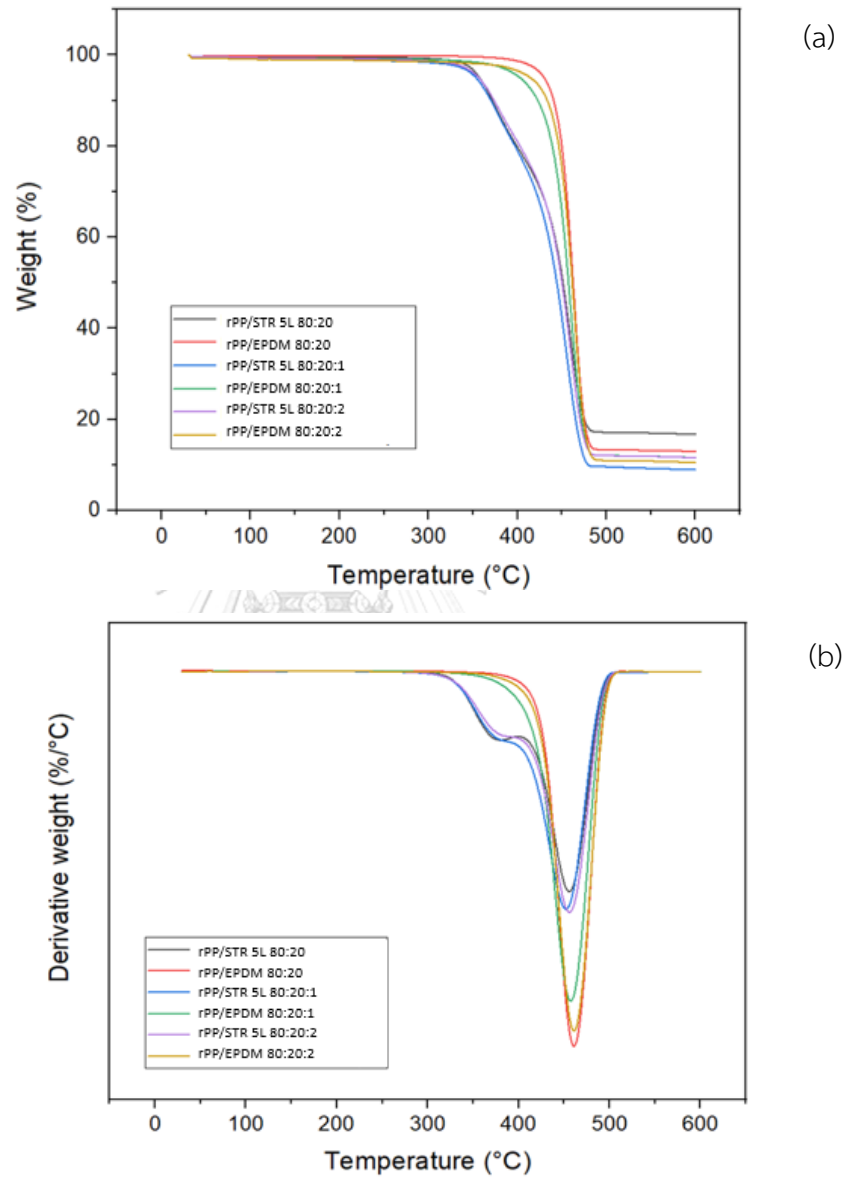
องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิสลายตัวสูงสุด 1 ชั้น เป็นการสลายตัวของพอลิเมอร์ในสายโซ่หลักที่ประมาณ 436.0 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า EPDM มีเสถียรภาพทางความร้อนที่มากกว่า STR 5L



รูปที่ 4.12 (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.12(a) และ (b) พบว่า TPEs จาก rPP/EPDM มีช่วงอุณหภูมิในการมีอุณหภูมิสลายตัวสูงสุด 1 ชั้น เนื่องจากยาง EPDM มีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวใกล้เคียงกับ rPP

ในขณะที่ TPEs จาก rPP/STR 5L มีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวสูงสุด 2 ชั้น โดยชั้นที่ 1 เป็นการสลายตัวของยาง STR 5L และชั้นที่ 2 เป็นของ rPP ซึ่งจะเห็นได้ว่า TPEs จาก rPP/EPDM มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า TPEs จาก rPP/STR 5L เนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวที่สูงกว่า (แสดงดังตารางที่ 4.3)



รูปที่ 4.13 (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM DCP ที่ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.13(a) และ (b) พบว่า TPEs และ TPVs จาก 80/20 rPP/EPDM ที่เติม DCP ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr มีช่วงอุณหภูมิในการมีอุณหภูมิสลายตัวสูงสุด 1 ชั้น ในขณะที่ TPEs และ TPVs จาก rPP/STR 5L มีช่วงอุณหภูมิในการมีอุณหภูมิสลายตัวสูงสุด 2 ชั้น โดยชั้นที่ 1 เป็นการสลายตัวของยาง STR 5L และชั้นที่ 2 เป็นของ rPP โดยจะเห็นได้ว่า TPEs และ TPVs จาก rPP/EPDM มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า TPEs และ TPVs จาก rPP/STR 5L เนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวที่สูงกว่า

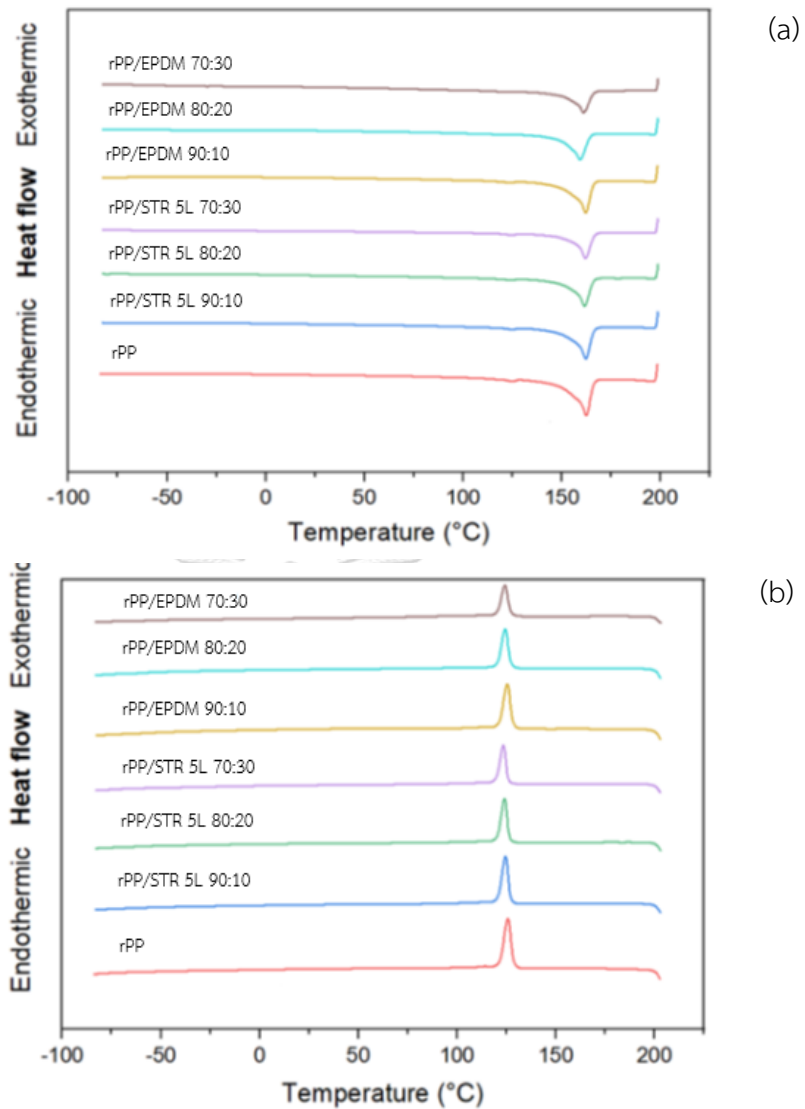
#### 4.3.2 พฤติกรรมทางความร้อน (thermal behavior)

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดผลึกของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 รวมถึง TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM DCP ที่ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr ด้วยเทคนิค DSC ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.4 ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ), อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature,  $T_c$ ), เอนทัลปีการเกิดผลึก (crystallization enthalpy,  $\Delta H_c$ ), และเอนทัลปีการหลอมเหลว (melting enthalpy,  $\Delta H_m$ ) จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง (second heating scan) และนำค่าที่ได้คำนวณหาระดับการเกิดผลึก (degree of crystallization) จากสมการที่ 3.1 โดยงานวิจัยนี้ให้อัตราให้ความร้อนและลดความเย็นเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส/นาที

ตารางที่ 4.4 พฤติกรรมทางความร้อนของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 รวมถึง TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM DCP ที่ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr

Sample	Second heating scan			Cooling scan		
	T <sub>g</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)	ΔH <sub>m</sub> (Jg <sup>-1</sup> )	T <sub>c</sub> (°C)	ΔH <sub>c</sub> (Jg <sup>-1</sup> )	X <sub>c</sub> (%)
rPP	-18.50	162.52	-64.49	125.82	78.25	31.14
<b>rPP/STR 5L (wt%/w%)</b>						
90/10	-19.10	162.23	-54.54	124.73	69.15	29.26
80/20	-22.10	161.64	-48.22	124.24	61.56	28.10
70/30	-22.70	162.09	-41.39	123.59	55.48	28.55
<b>rPP/EPDM (wt%/w%)</b>						
90/10	-20.80	162.31	-56.63	125.51	70.77	30.38
80/20	-21.90	159.28	-49.02	124.36	59.70	29.91
70/30	-22.50	161.16	-40.47	124.36	52.00	27.91
<b>rPP/STR 5L/DCP (wt%/w%/phr)</b>						
80/20/1	-20.50	161.86	-52.11	124.12	68.13	31.45
80/20/2	-21.90	160.91	-53.31	124.81	65.79	32.17
<b>rPP/EPDM/DCP (wt%/w%/phr)</b>						
80/20/1	-22.40	162.14	-45.38	124.92	60.80	27.39
80/20/2	-22.70	160.64	-45.05	124.88	62.19	27.19

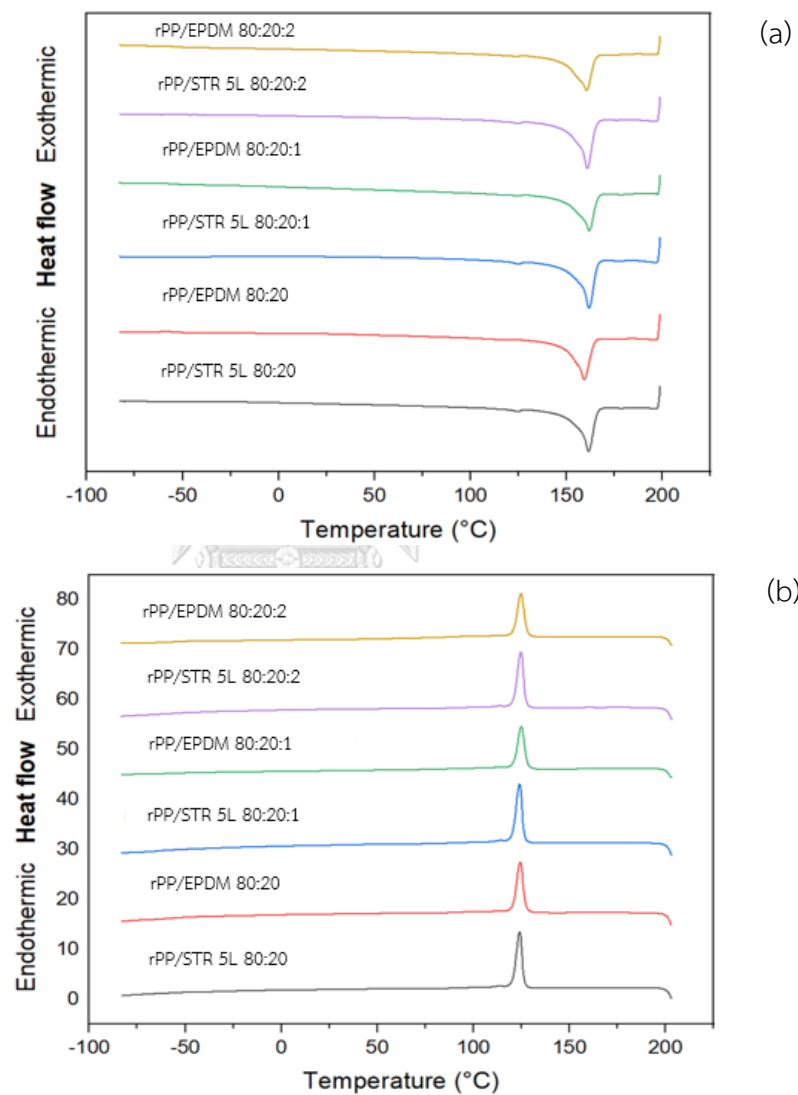
จากรูปที่ 4.14 แสดงเทอร์โมแกรมของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่สอง (a) และขั้นตอนการเย็นตัว (b) โดยแสดงค่าไว้ในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.14 สมบัติทางความร้อน: (a) ขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่สองและ (b) ขั้นตอนการเย็นตัวของ rPP และ TPEs ที่เติม STR 5L และ EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.14 (a) แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในการให้ความร้อนในครั้งที่สองพบว่า rPP มี  $T_g$  อยู่ที่  $-18.50$  องศาเซลเซียส ซึ่งการเตรียมเป็น TPEs จาก rPP/STR 5L และจาก rPP/EPDM จะส่งผลให้แนวโน้มค่า  $T_g$  ของ rPP มีค่าลดลงเล็กน้อย โดยอาจมีผลมาจากเมื่อเฟสของยางมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลทำให้สายโซ่ของ rPP เคลื่อนตัวได้ง่าย และเมื่อพิจารณาในส่วนของค่า  $T_m$  ใน rPP, TPEs จาก rPP/STR 5L และ TPEs จาก rPP/EPDM ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าปริมาณของสัดส่วนยางและชนิดของยางไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง  $T_m$  อย่างมีนัยสำคัญ (แสดงดังตารางที่ 4.4)

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.14 (b) แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัว พบว่า rPP มีปริมาณผลึกอยู่ที่ 31.14 % ซึ่งการเตรียมเป็น TEVs จาก rPP/STR 5L และจาก rPP/EPDM จะส่งผลให้แนวโน้มปริมาณผลึกมีค่าลดลง ซึ่งสัดส่วนยางที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเฟสของยางอาจทำให้เกิดการขัดขวางการเป็นผลึกของสายโซ่ของ rPP และเมื่อพิจารณาในส่วนของคุณค่า  $T_c$  พบว่าปริมาณของสัดส่วนยางและชนิดของยางไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง  $T_c$  อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.15 สมบัติทางความร้อน: (a) ขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่สองและ (b) ขั้นตอนการเย็นตัวของ TPVs จาก 80/20 rPP/STR 5L และ rPP/EPDM DCP ที่ปริมาณ 0, 1, และ 2 phr ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.15 (a) แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในการให้ความร้อนในครั้งที่สองพบว่า TPVs จาก rPP/STR 5L และจาก rPP/EPDM ที่อัตราส่วน 80/20 จะมี  $T_g$  ของ rPP อยู่ที่ -22.10 และ -21.90 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งการเติม DCP ที่ปริมาณ 1 และ 2 phr ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า  $T_g$  และ  $T_m$  (แสดงดังตารางที่ 4.4)

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.15 (b) แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวของ TPVs จาก rPP/STR 5L และจาก rPP/EPDM ที่อัตราส่วน 80/20 ที่เติม DCP 1 และ 2 phr พบว่าปริมาณผลึกและค่า  $T_c$  ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามปริมาณของ DCP ที่เพิ่มขึ้น

#### 4.4 สมบัติการคงรูปของสารประกอบยาง

ผลของการคงรูปของสารประกอบยางจากเครื่อง moving die rheometer (MDR) โดยแสดงเวลาก่อนบ่ม ( $t_{s2}$ ) เวลาในการขึ้นรูปสำหรับการคงรูป 90 % และเวลาในการขึ้นรูปสำหรับการคงรูป 90 % ( $t_{c90}$ ) ค่ามอดูลัสต่ำสุดและสูงสุดของยางระหว่างการคงรูป (ML และ MH) แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.5

สารประกอบยาง	$t_{s2}$	$t_{c90}$	ML (lb-in)	MH (lb-in)	MH - ML (lb-in)
STR 5L (DCP 1 phr)	3.52	5.47	1.29	3.89	2.60
STR 5L (DCP 2 phr)	1.74	6.01	1.43	5.76	4.33
EPDM (DCP 1 phr)	1.63	7.36	0.47	8.16	7.69
EPDM (DCP 2 phr)	1.33	7.19	0.48	9.70	9.22

จากตาราง 4.5 พบว่าในยาง STR 5L และยาง EPDM การเติม DCP ปริมาณ 1 และ 2 phr จะส่งผลทำให้เวลาก่อนบ่ม ( $t_{s2}$ ) ลดลงเนื่องจากปริมาณ DCP ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางที่เร็วขึ้น และค่ามอดูลัสของยางระหว่างการคงรูป (MH - ML) จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ DCP ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณการเชื่อมขวางที่มากขึ้นโดยพบว่ายาง EPDM มีค่ามอดูลัสสูงกว่ายาง STR 5L เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางที่มากกว่า



#### 4.5 ดรรชนีการหลอมไหล (MFI)

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของการทดสอบดรรชนีการหลอมไหลตามมาตรฐาน ASTM D1238 ด้วยน้ำหนัก 2.16 กิโลกรัมทดสอบที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสของ rPP, TPEs และ TPVs โดยมีการสกัดวัฏภาคของยางออกโดยการแช่โหลูอินที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 วัน ทิ้งไว้จนแห้ง

Sample	MFI (g/10 min)
rPP	5.97 ± 0.63
rPP/STR 5L	9.65 ± 0.60
rPP/EPDM	7.45 ± 0.34
rPP/STR 5L (DCP 1 phr)	13.29 ± 0.15
rPP/EPDM (DCP 1 phr)	8.21 ± 0.71
rPP/STR 5L (DCP 2 phr)	22.49 ± 1.56
rPP/EPDM (DCP 2 phr)	14.76 ± 1.21

#### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 4.6 พบว่า rPP มีดรรชนีการหลอมไหลเท่ากับ 5.97 กรัม/10 นาที โดยเมื่อทำการเติม DCP ปริมาณ 0, 1 และ 2 phr พบว่า TPVs มีค่ามีดรรชนีการหลอมไหลเพิ่มมากขึ้นเนื่องจาก DCP ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่ rPP ส่งผลให้ค่าดรรชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นเนื่องจากสายโซ่ที่สั้นลง และเมื่อพิจารณาจากชนิดของยางพบว่า TPEs และ TPVs จาก EPDM จะมีค่าดรรชนีการหลอมไหลต่ำกว่า TPEs และ TPVs จาก STR 5L เนื่องจากยาง EPDM มีสัดส่วนยางที่หายไปจากการสกัดวัฏภาคของยางออกน้อยกว่ายาง STR 5L อาจเพราะยาง EPDM มีการกระจายตัวที่ดีกว่ายาง STR 5L จึงเกิดเป็นโพรพขนาดเล็กลงและการเติม DCP ในยาง EPDM อาจเชื่อมขวางมากกว่ายาง STR 5L ส่งผลให้มีค่าดรรชนีการหลอมไหลต่ำกว่า

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน สัมพันธวิทยาของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (rPP) ด้วยการเตรียมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตจากยางธรรมชาติและยางอีทีดีเอ็มที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, และ 70/30 ที่เติม DCP ที่ปริมาณ 1 และ 2 phr ด้วยเครื่องผสมแบบปิดและขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. จากการตรวจสอบสัมพันธวิทยาของเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์พบว่าการผสมยางลงใน rPP ส่งผลให้พื้นผิวบริเวณรอยแตกจากการทดสอบความทนต่อแรงกระแทกมีความขรุขระ และเห็นถึงความไม่เข้ากันระหว่าง TPEs จาก rPP/STR 5L โดยดูได้จากวัฏภาคของยาง STR 5L ที่อยู่รวมกันมากกว่ายาง EPDM และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของยางจะส่งผลให้วัฏภาคของยางมีขนาดใหญ่ขึ้น

2. จากการตรวจสอบสัมพันธวิทยาของเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตโดยเติม DCP ในปริมาณ 1 และ 2 phr พบว่าการเติม DCP ส่งผลทำให้วัฏภาคของยางเกิดการแตกตัวออกกระจายไปทั่ววัฏภาคของพลาสติกซึ่งอาจเกิดจากการเชื่อมขวางของยางและแรงเฉือนในการผสม

3. การเตรียมเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์โดยผสมยางลงใน rPP ส่งผลให้ ความทนแรงดึง ยังสัมผดูลัส ความทนแรงดัดโค้ง ความแข็ง ลดลงตามอัตราส่วนยางที่เพิ่มขึ้น แต่ความทนแรงกระแทก การยืดตัว ณ จุดขาด เพิ่มสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าการผสมยางช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงที่เกิดจากการรีไซเคิลใช้งานซ้ำของ rPP โดยยาง STR 5L มีการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่ายาง EPDM ในงานวิจัยนี้จึงนำอัตราส่วน 80/20 ไปเตรียมเป็นเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต

4. การเตรียมเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตโดยเติม DCP ในปริมาณ 1 และ 2 phr ส่งผลให้ยังสัมผดูลัส เพิ่มสูงขึ้น แต่ความทนแรงดึง ความทนแรงดัดโค้ง ความทนแรงกระแทก การยืดตัว ณ จุดขาด ลดต่ำลงเนื่องจากการตัดขาดของสายโซ่ของ rPP ตามปริมาณของ DCP ที่เพิ่มขึ้น

5. จากการตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนของเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์ และเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตพบว่าการเติมยาง STR 5L ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของ

TPEs และ TPVs ลดลง แต่การใส่ยาง EPDM ไม่ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนเปลี่ยนแปลงไปมากนักเนื่องจากยาง EPDM มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี และการเติม DCP ไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของ TPVs อย่างมีนัยสำคัญ

6. จากการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์และเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตพบว่า การเติมยางส่งผลให้ rPP ลดความสามารถในการตกผลึกและอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วลดลงตามปริมาณของยางที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากให้วิภาคของยางขัดขวางการตกผลึกของสายโซ่ และการเติม DCP ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการตกผลึก อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว อุณหภูมิการหลอมเหลว อย่างมีนัยสำคัญ

7. จากการตรวจสอบการคงรูปของสารประกอบยางพบว่า การเติม DCP ส่งผลทำให้เวลาบ่ม ( $t_{52}$ ) ลดลงเนื่องจากปริมาณ DCP ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางที่เร็วขึ้น และค่ามอดูลัสของยางระหว่างการคงรูป (MH - ML) จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ DCP ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณการเชื่อมขวางที่มากขึ้น

8. จากการตรวจสอบดรรชนีการหลอมไหลพบว่า เมื่อทำการเติม TPVs จะมีค่ามอดูลัสการหลอมไหลเพิ่มขึ้นเนื่องจาก DCP ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่ rPP ส่งผลให้ค่าดรรชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทดลองโดยเพิ่มสารโคเอเจนต์ เพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้และสมบัติทางกลให้กับเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต
2. ควรศึกษาปริมาณสารวัลคาไนซ์ที่มากขึ้น เพื่อหาช่วงปริมาณที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต
3. ควรศึกษาการบวมตัวของยาง เพื่อหาปริมาณการเชื่อมขวางที่เกิดในยาง
4. ควรศึกษาอุณหภูมิการตัดโค้งงอเนื่องจากความร้อนของเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์และเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต เพื่อคุณสมบัติเชิงกลในช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่สูง



ภาคผนวก ก  
 ดรรชนีการหลอมไหล

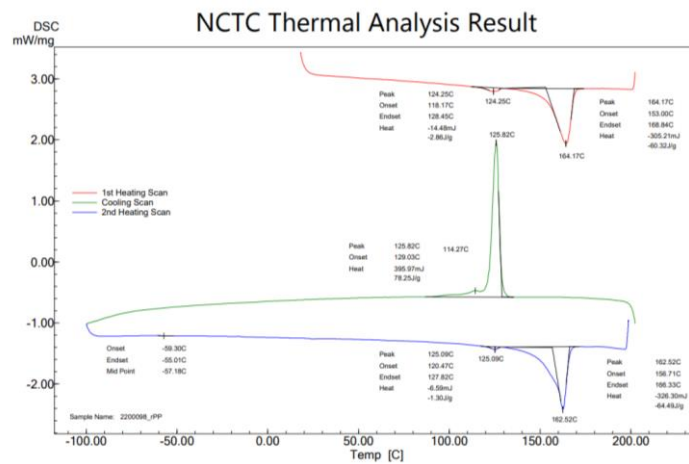
ตาราง ก-1 ดรรชนีการหลอมไหลของ rPP, TPEs และ TPVs ที่เติม DCP ปริมาณ 0, 1 และ 2 phr  
 ที่อัตราส่วน 80/20

Sample	MFI (g/10 min)
rPP	5.29
	6.55
	6.07
Avg.	5.97
SD.	0.63
rPP/STR 5L	9.54
	9.12
	10.31
Avg.	9.65
SD.	0.60
rPP/EPDM	7.11
	7.79
	7.45
Avg.	7.45
SD.	0.34
rPP/STP 5L (DCP 1 phr)	13.29
	13.4
	13.31
Avg.	13.29
SD.	0.15
rPP/EPDM (DCP 1 phr)	8.11

	7.55
	8.97
SD.	8.21
rPP/EPDM	0.71
rPP/STP 5L (DCP 1 phr)	21.57
	24.30
	21.61
SD.	22.49
rPP/EPDM	1.56
rPP/EPDM (DCP 2 phr)	15.63
	15.29
	13.38
SD.	1.21
rPP/EPDM	14.76

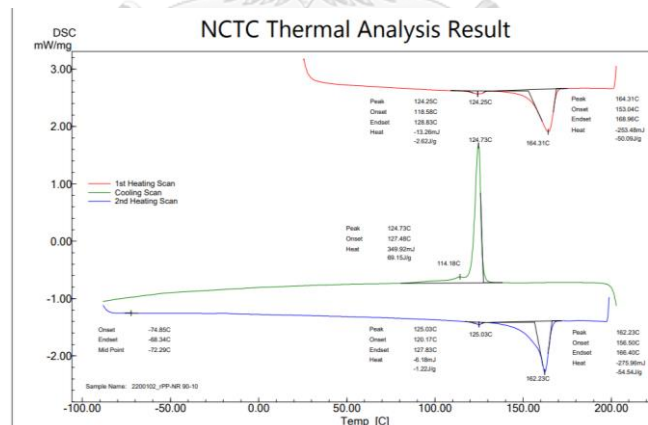
ภาคผนวก ข  
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC

รูปที่ ข(1-11) แสดงเทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC ของ rPP, TPES และ TPVs



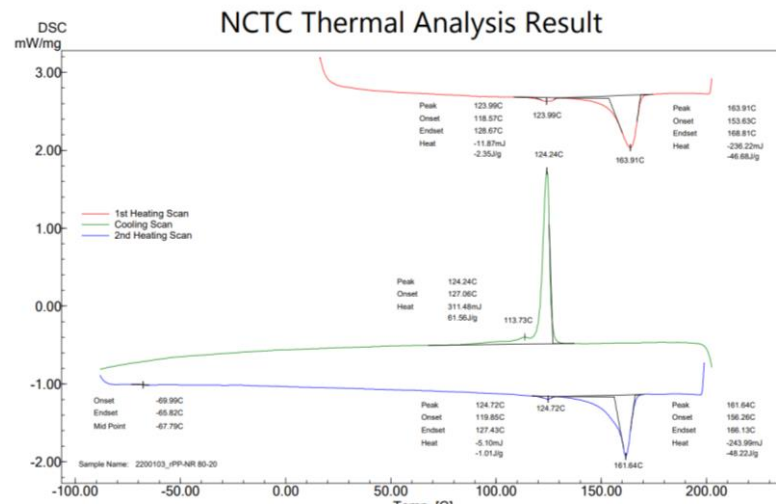
รูปที่ ข-1 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ

rPP



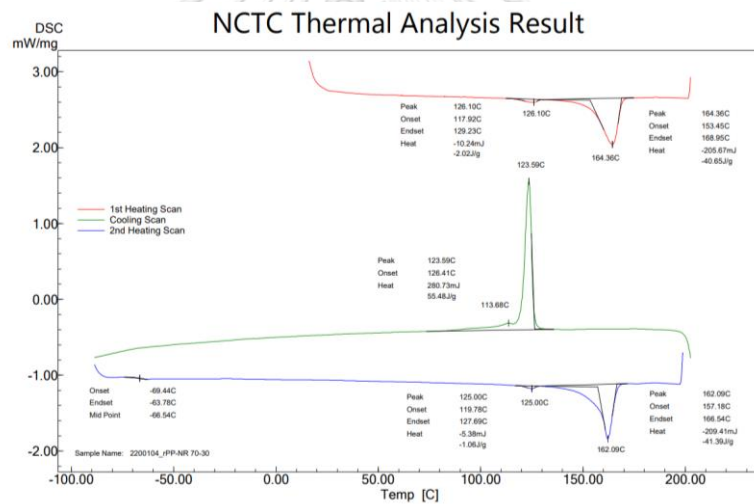
รูปที่ ข-2 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ

rPP/STR 5L 90/10



รูปที่ ข-3 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ

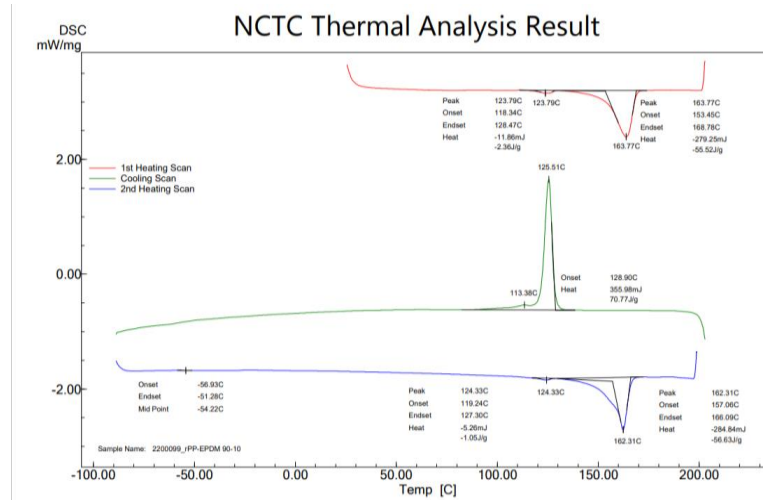
rPP/STR 5L 80/20



รูปที่ ข-4 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ

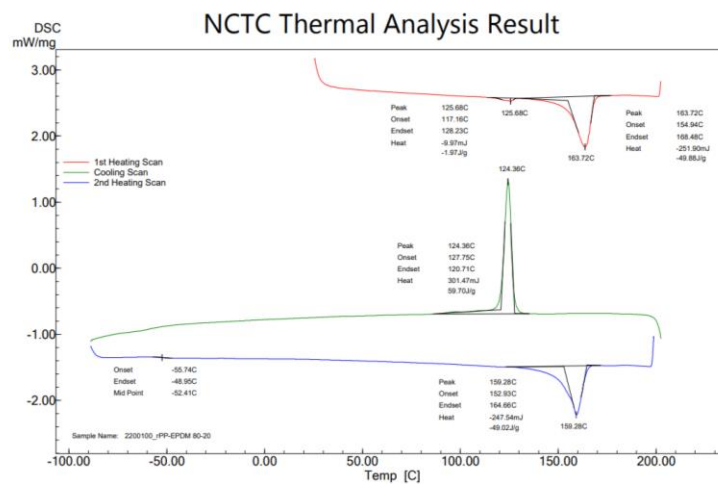
rPP/STR 5L 70/30





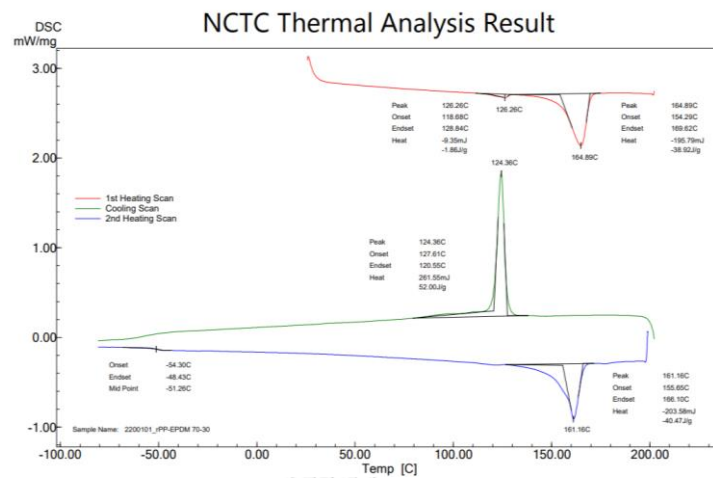
รูปที่ ข-5 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ

rPP/EPDM 90/10



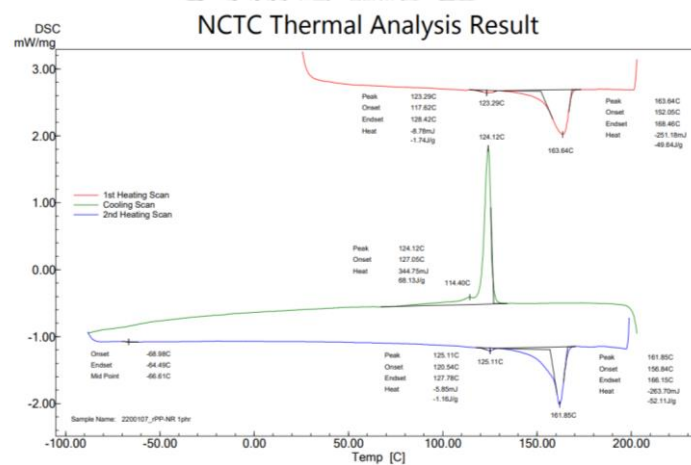
รูปที่ ข-6 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ

rPP/EPDM 80/20



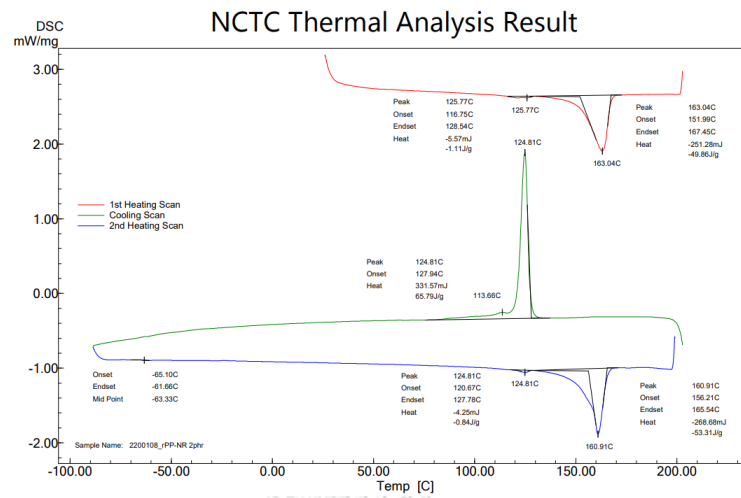
รูปที่ ข-7 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ

rPP/EPDM 70/30

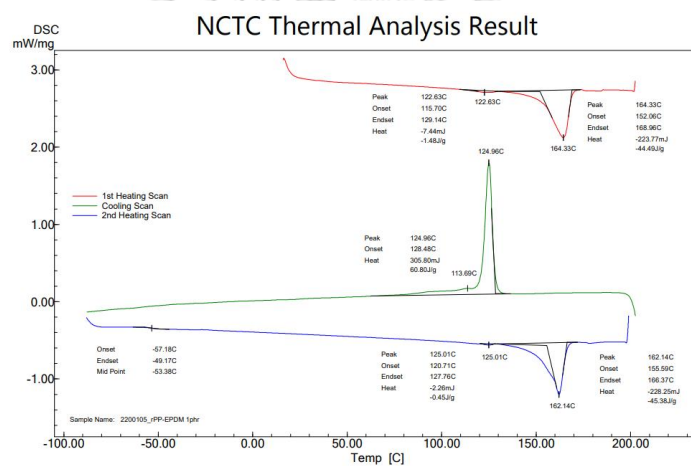


รูปที่ ข-8 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ

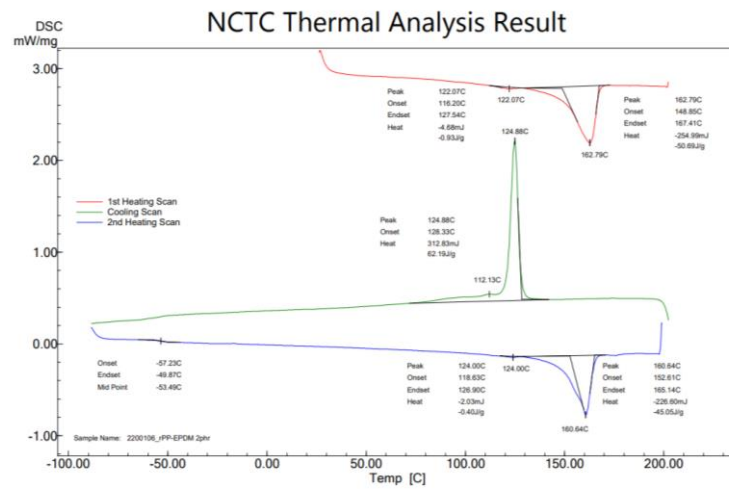
rPP/STR 5L 80/20 DCP 1 phr



รูปที่ ข-9 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ rPP/STR 5L 80/20 DCP 2 phr



รูปที่ ข-10 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ rPP/EPDM 80/20 DCP 1 phr

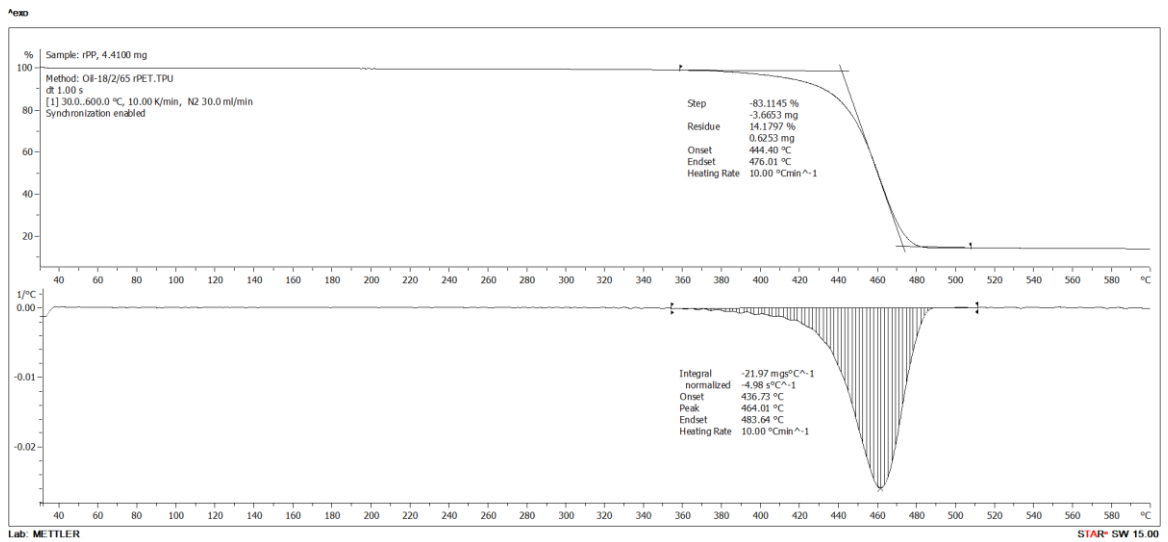


รูปที่ ข-11 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ

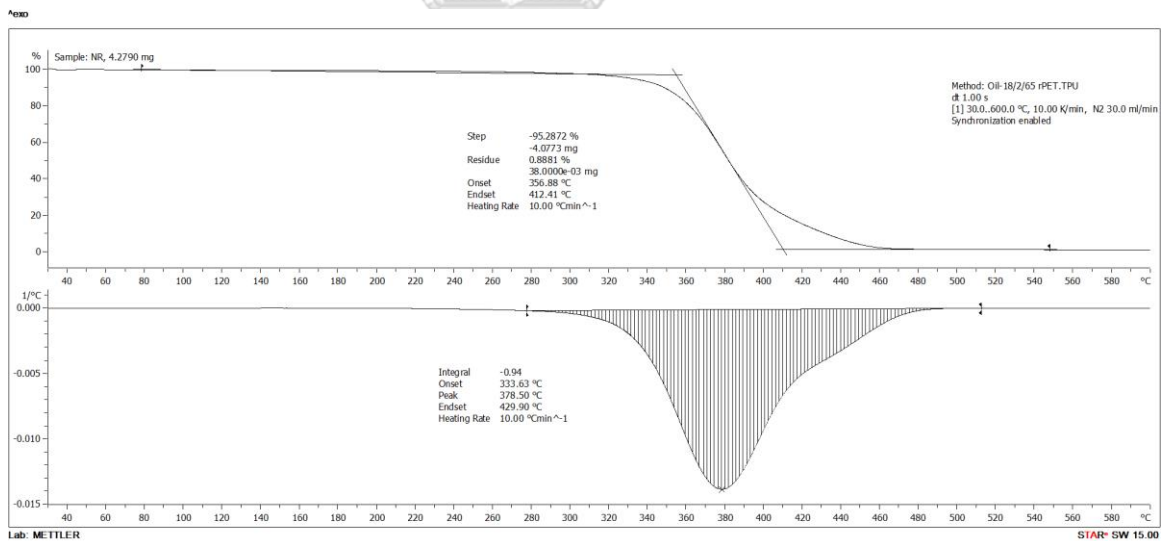
rPP/EPDM 80/20 DCP 2 phr

ภาคผนวก ค  
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA

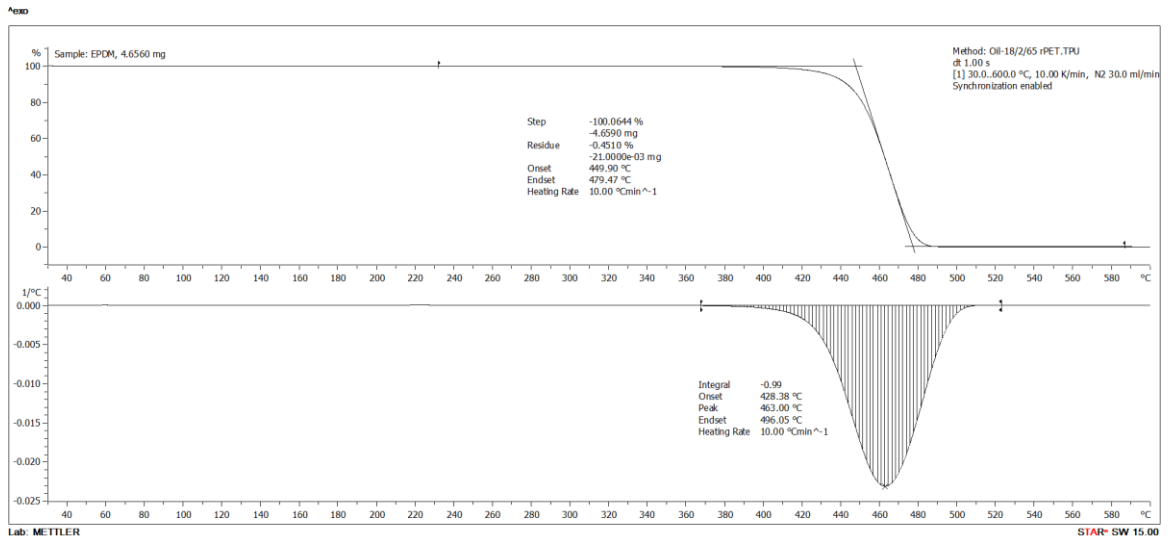
รูปที่ ค(1-11) แสดงเทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ rPP, TPEs และ TPVs



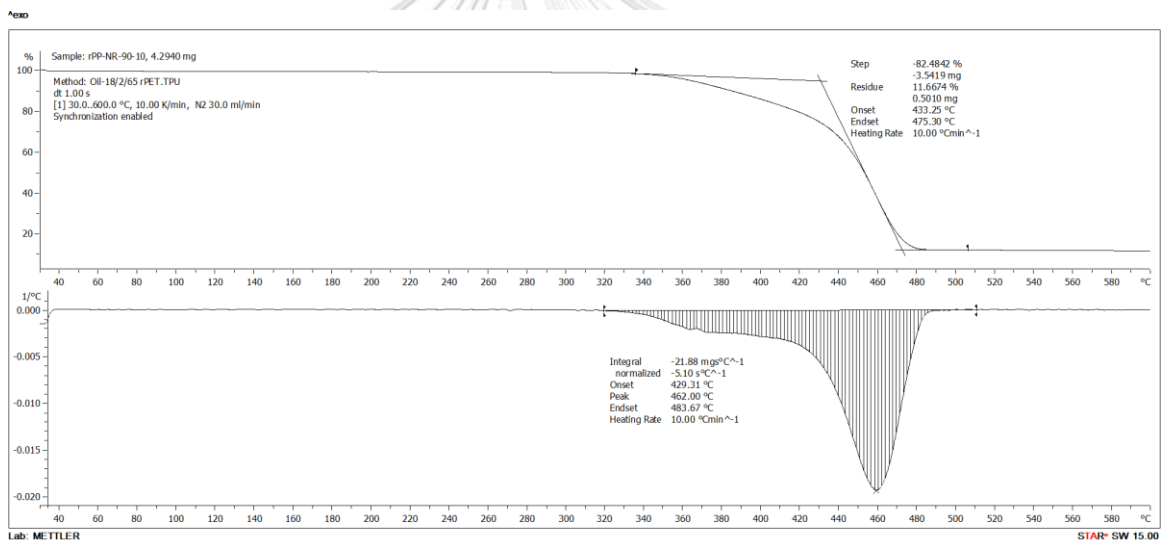
รูปที่ ค-1 TGA เทอร์โมแกรมของ rPP



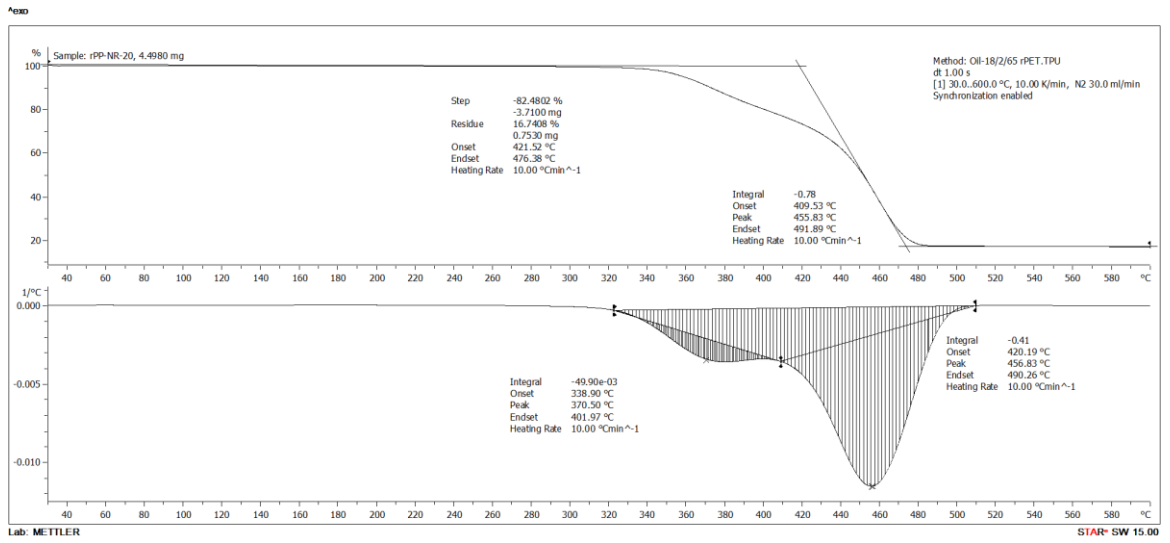
รูปที่ ค-2 TGA เทอร์โมแกรมของ STR 5L



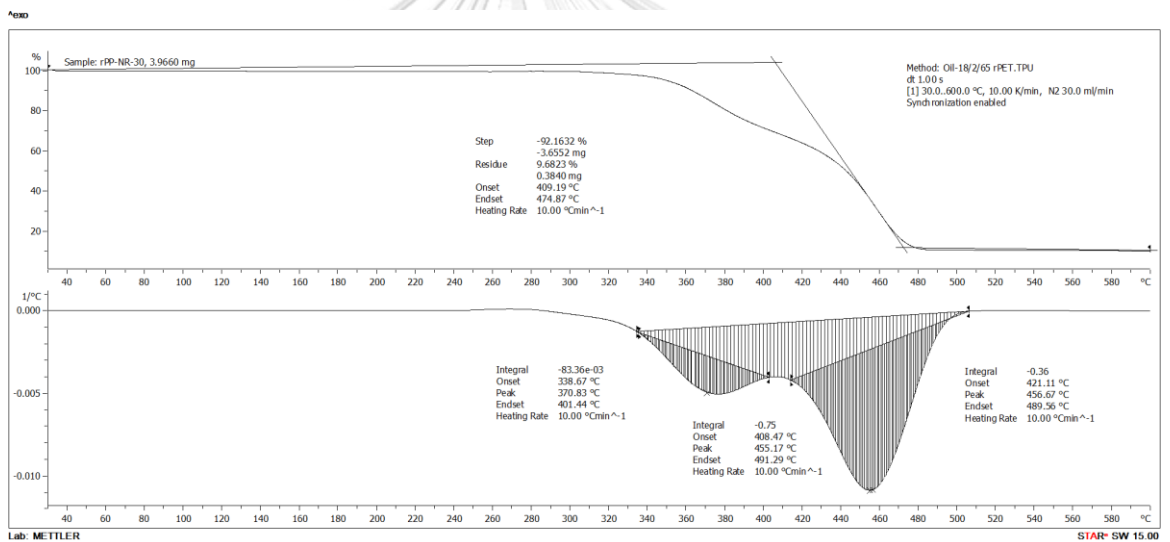
รูปที่ ค-3 TGA เทอร์โมแกรมของ EPDM



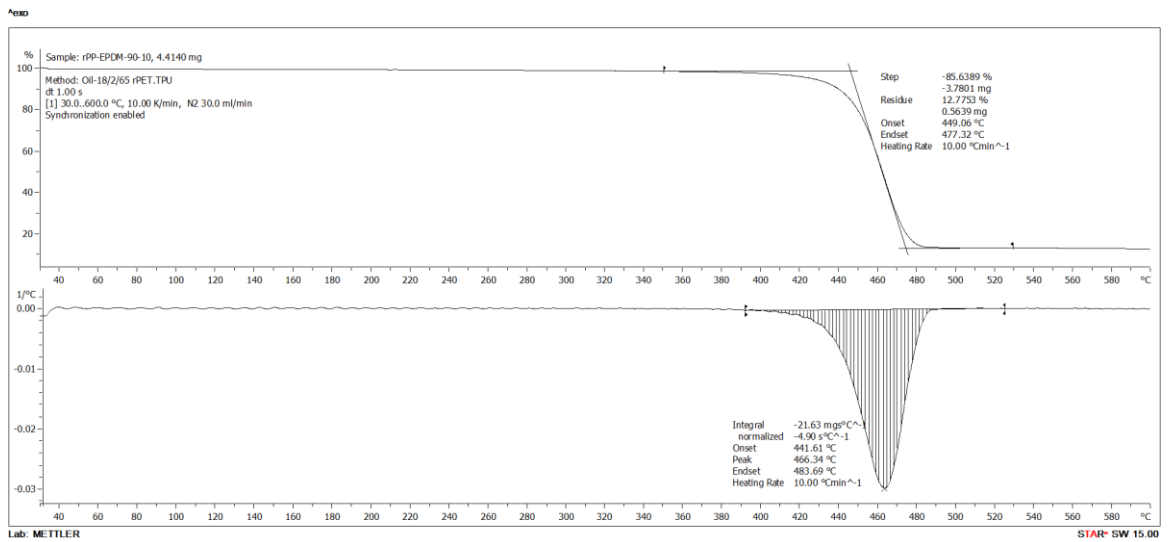
รูปที่ ค-4 TGA เทอร์โมแกรมของ rPP/STR 5L 90/10



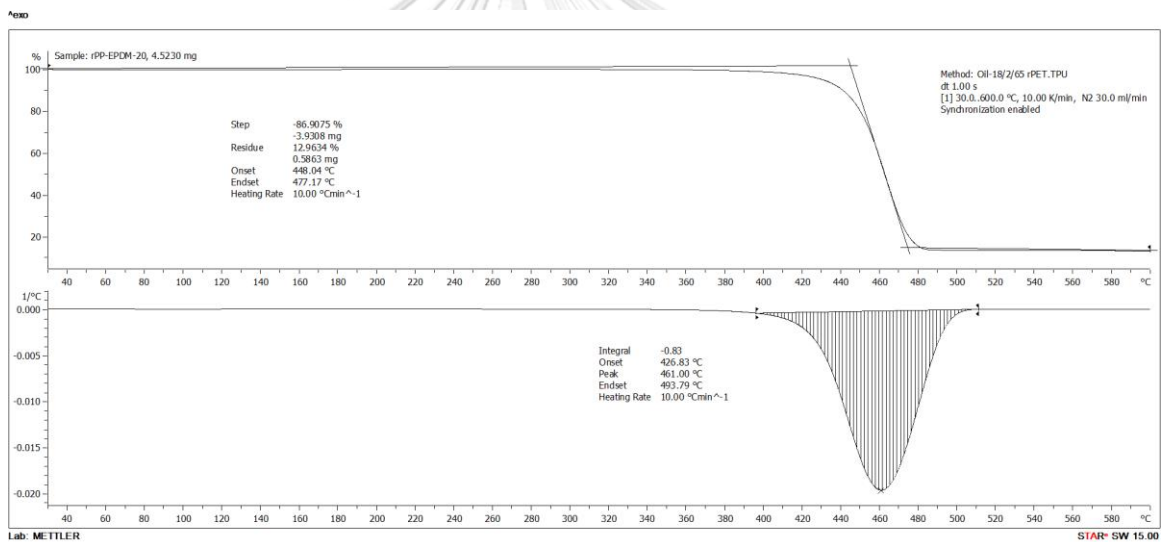
รูปที่ ค-5 TGA เทอร์โมแกรมของ rPP/STR 5L 80/20



รูปที่ ค-6 TGA เทอร์โมแกรมของ rPP/STR 5L 70/30

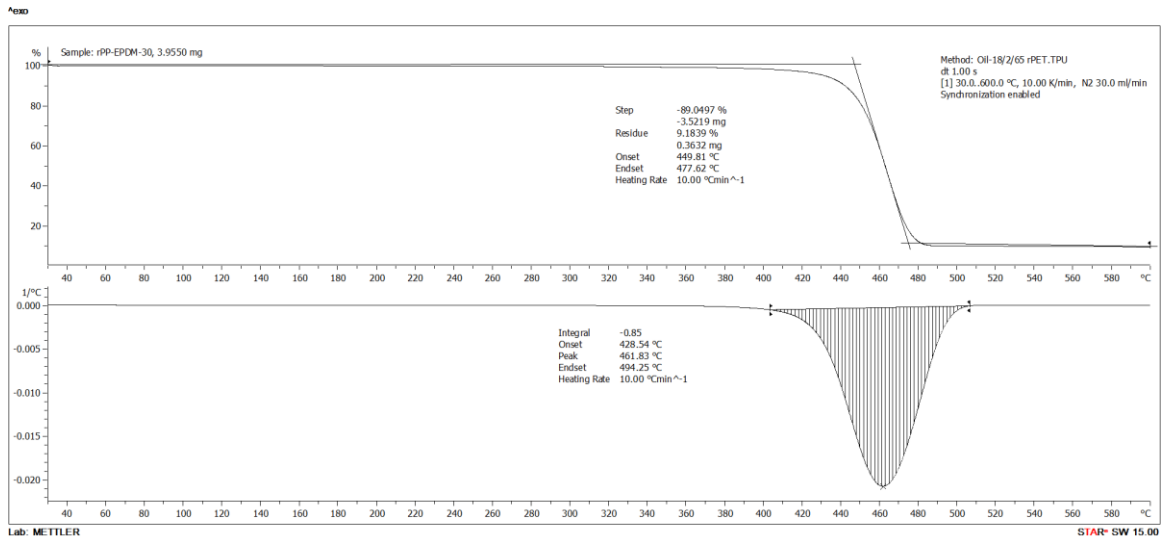


รูปที่ ค-7 TGA เทอร์โมแกรมของ rPP/EPDM 90/10

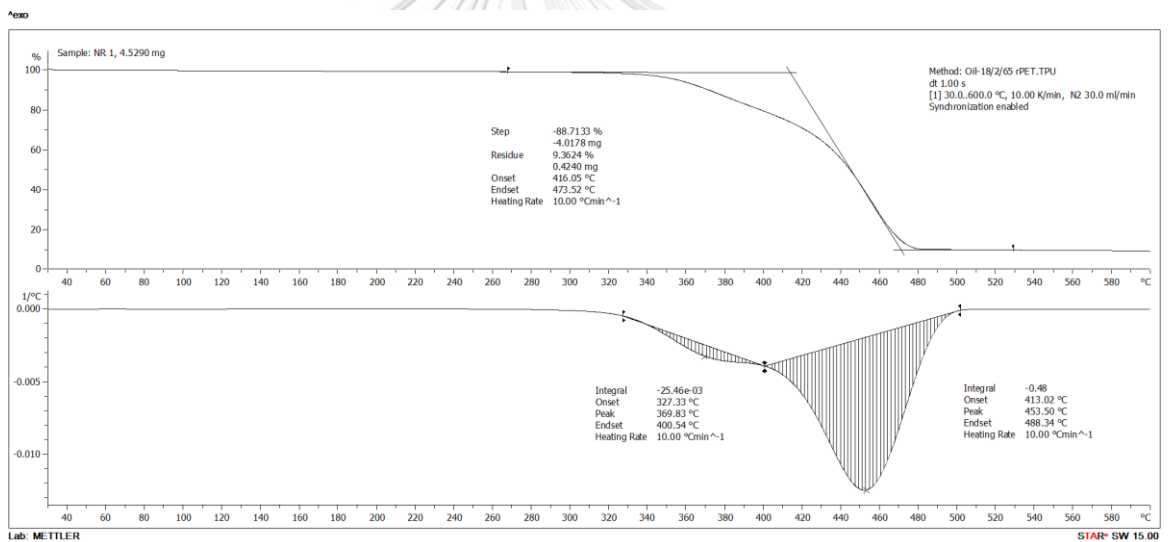


รูปที่ ค-8 TGA เทอร์โมแกรมของ rPP/EPDM 80/20

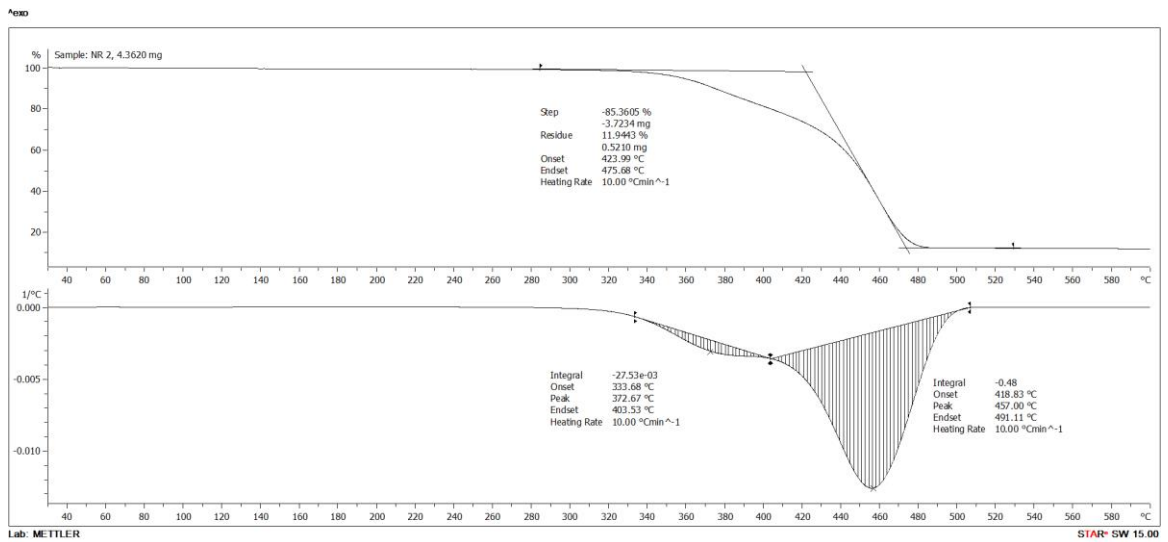




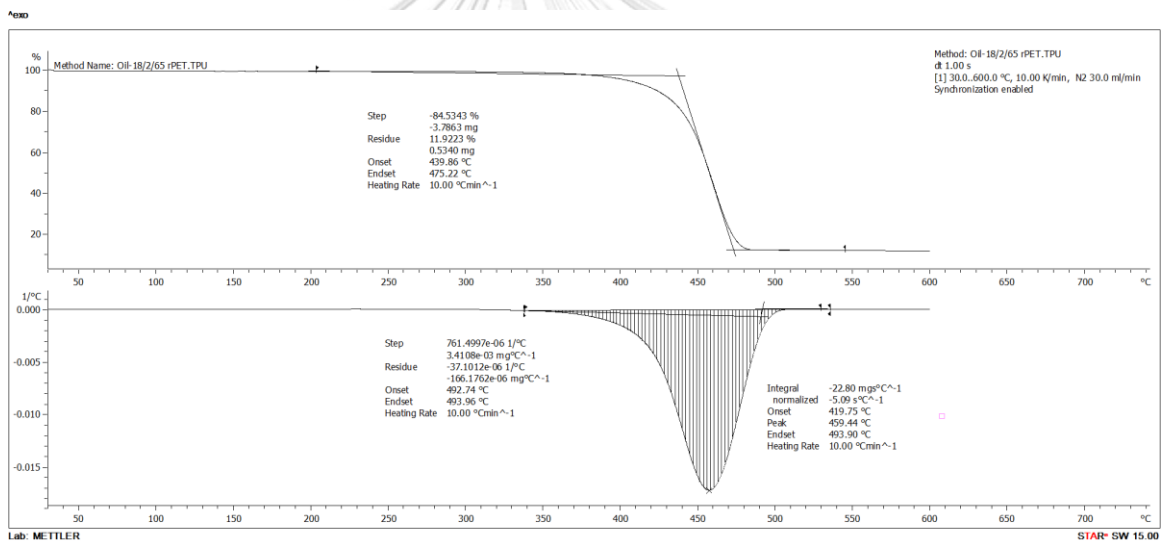
รูปที่ ค-9 TGA เทอร์โมแกรมของ rPP/EPDM 70/30



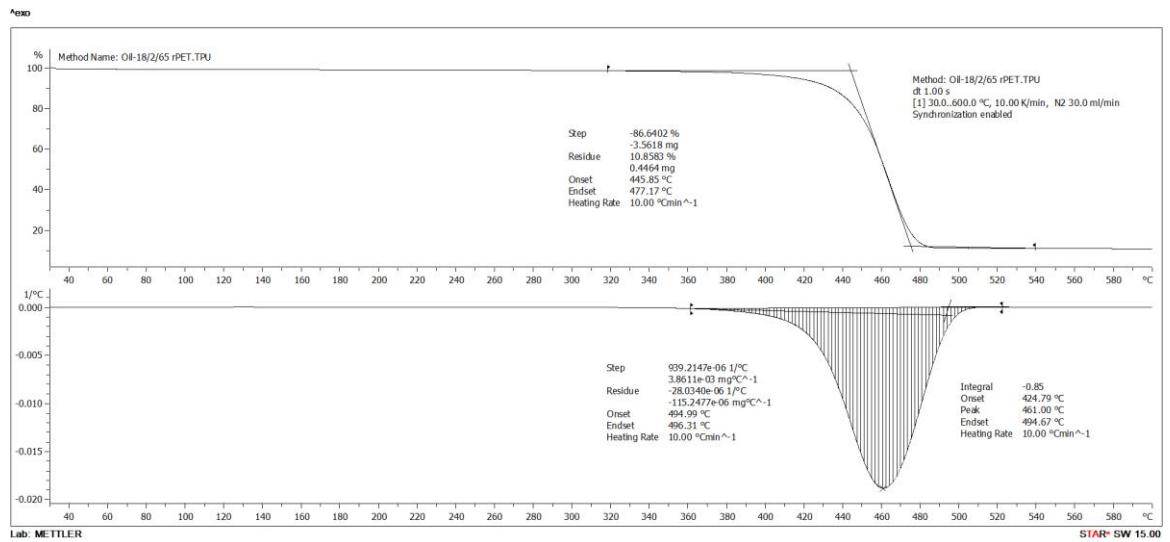
รูปที่ ค-10 TGA เทอร์โมแกรมของ rPP/STR 5L 80/20 DCP 1 phr



รูปที่ ค-11 TGA เทอร์โมแกรมของ rPP/STR 5L 80/20 DCP 2 phr



รูปที่ ค-12 TGA เทอร์โมแกรมของ rPP/EPDM 80/20 DCP 1 phr



รูปที่ ค-13 TGA เทอร์โมแกรมของ rPP/EPDM 80/20 DCP 2 phr



## บรรณานุกรม

1. A.A. Matias, M.S.L., J. Pereira, P. Pereira, R. Barros, J.F.J. Coelho, A.C. Serra, *Use of recycled polypropylene/poly(ethylene terephthalate) blends to manufacture water pipes: An industrial scale study*. Waste Management, 2020. 101: p. 250-258.
2. S.M. Lai, F.C.C., T.Y. Chiu, *Fracture behaviors of PP/mPE thermoplastic vulcanizate via peroxide crosslinking*. European Polymer Journal, 2005. 41: p. 3031-2041.
3. Wanida, N., *Thermoplastic Vulcanizates based on Blends of Natural Rubber Grafted with Poly(acetoacetoxyethyl methacrylate) and Polyamide-12 in Department of Polymer Technology*. 2017, Songkla University.
4. Charoen, N., *Influence of type and level of oil, filler, polypropylene, natural rubber and vulcanization system on properties of thermoplastic elastomer based on natural rubber and polypropylene blends*, in *Department of Rubber and Polymer Technology*. 2009, Songkla University: Ph.D.
5. Utracki, L.A., *Polymer Blends Handbook*. 2002: Kluwer Academic Pub.
6. Napat, T., *Bio-based polymer blends from poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) and epoxidized natural rubber*, in *Department of Petrochemical and Polymer Science*. 2021, Chulalongkorn University.
7. Robeson, L.M., *Polymer blends*. A Comprehensive review. 2007.
8. Holden, G., *Understanding Thermoplastic Elastomers*. 2000: Hanser.
9. ยางธรรมชาติและแนวโน้มในตลาดสหภาพยุโรป. สำนักงานที่ปรึกษาการเกษตรต่างประเทศ ประจำสหภาพยุโรป 2021; Available from: [https://appdb.tisi.go.th/tis\\_devs/regulate/eu/pdf/Natural\\_Rubber\\_290764.pdf](https://appdb.tisi.go.th/tis_devs/regulate/eu/pdf/Natural_Rubber_290764.pdf).
10. P. Teepakorn, J.J., *Inversion application of hollow die for capillary reometer*” *B.Eng. Thesis, Department of polymer engineering technology, in polymer engineering technology*. 2019, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

11. Siriwong, S., *Preparation of thermoplastic elastomer based on maleated natural rubber and poly(methyl methacrylate) blends by dynamic vulcaniation process*. 2006, Prince of Songkla University.
12. polytechindustry. *EPDM RUBBER*. 2023; Available from: <https://www.polytechindustry.co.th/%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87epdm>.
13. Naskar, K., *Dynamically vulcanized PP/EPDM thermoplastic elastomers*. Exploring novel routes for crosslinking with peroxides. 2004.
14. Phisuttian, N., *Preparation and properties of thermoplastic elastomer made from biodegradable polyester blended with natural rub*. 2012, Prince of Songkla University.
15. Sutus, S., *EPDM/polypropylene thermoplastic vulcanizates of peroxide through twin screw process*, in *Department of Chemical Engineering*. 2005, Chulalongkorn University.
16. Y. Chen, C.X., L. Cao, Y. Wang, X. Cao, *PP/EPDM-based dynamically vulcanized thermoplastic olefn with zincdimethacrylate: Preparation, rheology, morphology, crystallization and mechanical properties*. *Polymer Testing*, 2012. 31: p. 728–736.
17. T. Korn, T.T., P. Pranee, R. Polphat , R. Jareerat, L. Fabienne, E. Mathieu, D. Philippe, *Raman investigation of thermoplastic vulcanizates based on hydrogenated natural rubber/polypropylene blends*. *Polymer Testing*, 2017. 57: p. 107–114.
18. T. Anoma, N.C., S. Kannika, N. Jacques, *Effect of different types of peroxides on rheological, mechanical, and morphological properties of thermoplastic vulcanizates based on natural rubber/polypropylene blends*. *Polymer Testing*, 2007. 26: p. 537–546.
19. G. Martin, C.B., P. Sonntag, N. Garois, P. Cassagnau *Morphology development in thermoplastic vulcanizates (TPV): dispersion mechanisms of a pre-crosslinked EPDM phase*. *European Polymer Journal*, 2009. 45: p. 3257–3268.

20. C. Nakason, P.W., A. Kaesaman *Effect of vulcanization system on properties of thermoplastic vulcanizates based on epoxidized natural rubber/polypropylene blends*. *Polymer Testing*, 2005. 25: p. 34-41.
21. P. Thummanukitcharoen, S.L., K. Srikulkit, *Preparation of Organosilane Treated Microcrystalline (SiMCC) and SiMCC/Polypropylene Composites*. *Materials and Minerals*, 2012. 13-19.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ทีปกร พันธุ์พรม
วัน เดือน ปี เกิด	15 กันยายน 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่อยู่ปัจจุบัน	4/141 หมู่.5 ต.บางใหญ่ อ.บางใหญ่ จ.นนทบุรี 11140



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY