

การพัฒนาเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตจากยางโบรโมบิวทิลและพอลิโพรพิลีนสำหรับจุกปิดหลอด  
เก็บเลือด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม ไม่สังกัดภาควิชา/เทียบเท่า  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF THERMOPLASTIC VULCANIZATES FROM BROMOBUTYL RUBBER  
AND POLYPROPYLENE FOR BLOOD COLLECTION STOPPERS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Science for Industry

Common Course

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซตจากยางโบรโม บิวทิลและพอลิโพรพิลีนสำหรับจุกปิดหลอดเก็บเลือด
โดย	น.ส.สุพรรณษา คุณขยัน
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ (ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.จิรรัตน์ อนันตกุล)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก (รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม (รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)
.....	กรรมการ (ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ใหญ่ชีระนันท์)
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย (รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด)



# # 6370213923 : MAJOR SCIENCE FOR INDUSTRY

KEYWORD: Thermoplastic vulcanizate, Bromobutyl rubber, Polypropylene,  
Blood collection stoppers, Reprocessibility

Supansa Khunkayan : DEVELOPMENT OF THERMOPLASTIC VULCANIZATES  
FROM BROMOBUTYL RUBBER AND POLYPROPYLENE FOR BLOOD  
COLLECTION STOPPERS . Advisor: Assoc. Prof. SIRILUX POOMPRADUB, Ph.D.  
Co-advisor: Assoc. Prof. KANOKTIP BOONKERD, Ph.D.

This research aims to study the mixture ratio of BIIR:PP:EOC to obtain a hardness as required by the hardness of the commercial stoppers. The result showed the hardness of B65P10E25 at the ratio of BIIR 65 wt%:PP 10 wt%:EOC 25 wt% was 43 Shore A which was in the range of hardness standard of stoppers. Therefore, this ratio of B65P10E25 was chosen to prepare thermoplastic vulcanizate (TPV) by adding 1.5 wt% of dicumyl peroxide as a vulcanizing agent and 1 wt% of trimethylolpropane trimethacrylate as a coagent. The mechanical properties of B65P10E25 TPV showed an increase in the hardness, tensile strength, elongation at break and tear resistance while the compression set of B65P10E25 TPV was decreased by 21.83% compared to the B65P10E25 without the vulcanizing agents. The SEM micrograph revealed that the increased EOC amount could enhance the compatibility and distribution between the BIIR phase and PP phase. Moreover, the self-sealing properties could be achieved at over 25 wt% of EOC content such as B65P10E25, B65E35 (BIIR 65 wt% and EOC 35 wt%) and B65P10E25 TPV. The oxygen gas permeability of B65P10E25 TPV was  $151.81 \text{ cm}^3 \cdot \text{mm} / \text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot 0.1 \text{ MPa}$  which complied with the requirement. Accordingly, this study could prepare TPV with the superior in all mechanical properties, low gas permeability and good self-sealability to conform to the criteria of the stopper in the blood collection tubes. In addition, TPV also could be reproducible.

Field of Study: Science for Industry

Student's Signature .....

Academic Year: 2021

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เนื่องด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ คอยชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหา และเป็นທີ່ปรึกษาตลอดการทำงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิรารัตน์ อนันตกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ทิณชีระนันท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอก ที่ได้สละเวลาอันมีค่าและให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณภาคีวิทยาศาสตร์ และภาคีวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้ออำนวยสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ สำหรับทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคุณสุดาทิพย์ สายทอง ผู้จัดการโรงงานประจำ Pharma Plant บริษัท เอส.เค. โพลีเมอร์ จำกัด ที่คอยสนับสนุนวัสดุและสารเคมีสำหรับทำวิจัย และช่วยประสานงานเกี่ยวกับเรื่องขึ้นรูปและเครื่องมือทดสอบ

ขอขอบคุณโครงการแพลตฟอร์มการศึกษาครบวงจรเพื่อการพัฒนานวัตกรรมของภาคอุตสาหกรรม ซึ่งได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากหน่วยบริหารและจัดการทุน หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บพค.) สำนักงานนโยบายการอุดมศึกษาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.)

ขอขอบคุณโครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย (Innovation Technology Assistance Program, ITAP) โครงการวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม (Science for Industry, Sci-FI) และบริษัท เอส.เค. โพลีเมอร์ จำกัด ที่ได้ให้ทุนสำหรับการศึกษาและวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัว และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

สุพรรณษา คุณขยัน

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1 .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 .....	5
2.1 เทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....	5
2.2 ประเภทของเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์ .....	5
2.2.1 เทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์แบบบล็อกโคพอลิเมอร์ .....	6
2.2.2 เทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์เบลนด์ .....	10
2.3 ความเข้ากันได้ของการเบลนด์.....	11
2.4 ยางโบริมบิวทิล.....	12
2.5 พอลิพรพิลีน .....	14
2.6 เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์.....	15

2.7 สารเชื่อมขวางโมเลกุลพอลิเมอร์ .....	16
2.7.1 ระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยกำมะถัน.....	16
2.7.2 ระบบการเชื่อมขวางด้วยสารที่ให้กำมะถัน.....	17
2.7.3 ระบบการเชื่อมขวางด้วยสารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน .....	17
2.8 ระบบการเชื่อมขวางด้วยเพอร์ออกไซด์ .....	19
2.8.1 กลไกการเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยเพอร์ออกไซด์.....	19
2.8.2 การใช้สารโคเอเจนต์ในระบบการเชื่อมขวางด้วยเพอร์ออกไซด์.....	20
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 .....	25
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	25
3.1.1 ยางโบรโมบิวทิล .....	26
3.1.2 พอลิพรพิลีนแบบสุ่ม.....	27
3.1.3 เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ .....	27
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	29
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม BIIR:PP:EOC .....	30
3.3.2 การเตรียม B65P10E25 TPV.....	30
3.3.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness test).....	31
3.3.4 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength test).....	32
3.3.5 การทดสอบความต้านทานต่อแรงฉีกขาด (Tear strength test).....	34
3.3.6 การทดสอบการคืนตัวกลับหลังถูกกด (Compression set test) .....	34
3.3.7 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม.....	35
3.3.8 การทดสอบสมบัติหลังการหลอมขึ้นรูปซ้ำ (Reprocessing) .....	36
3.3.9 การทดสอบความสามารถในการคืนตัวกลับหลังแทงเข็ม .....	37



3.3.10 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านแก๊ส (Gas permeability test).....	40
บทที่ 4 .....	43
4.1 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ BIIR:PP:EOC.....	43
4.1.1 สมบัติเชิงกล .....	43
4.1.1.1 สมบัติความแข็ง.....	43
4.1.1.2 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง .....	44
4.1.1.3 สมบัติความต้านทานต่อแรงฉีกขาด .....	46
4.1.1.4 สมบัติการคืนตัวหลังได้รับแรงกด .....	47
4.1.2 สัณฐานวิทยา.....	48
4.2 การเตรียม B65P10E25 TPV .....	50
4.2.1 สมบัติเชิงกล .....	50
4.2.2 สัณฐานวิทยา.....	51
4.2.3 ความสามารถในการหลอมขึ้นรูปซ้ำ.....	52
4.2.3.1 สมบัติทางกายภาพ.....	53
4.2.3.2 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง .....	55
4.3 ความสามารถในการคืนตัวกลับหลังแทงเข็ม.....	56
4.4 ความสามารถในการซึมผ่านแก๊ส .....	59
4.5 การวิเคราะห์ต้นทุน.....	64
บทที่ 5 .....	66
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	67
บรรณานุกรม.....	69
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก.....	76

ภาคผนวก ข.....	80
ภาคผนวก ค.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	84



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 สัดส่วนปริมาณการใช้ TPE ในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั่วโลก ปี 2021.....	6
รูปที่ 2.2 แผนผังการจำแนกประเภทของเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์แบบบล็อกโคพอลิเมอร์.....	7
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ (a) SBS, (b) SIS และ (c) SEBS .....	8
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ Ester-based TPU และ Ether-based TPU .....	8
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ TPEE .....	9
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของ TPE-A .....	9
รูปที่ 2.8 สันฐานวิทยาของ TPE ที่ได้จากการเบลนด์แบบปกติ.....	10
รูปที่ 2.9 ลักษณะสันฐานวิทยาของ TPV ที่ได้จากการเบลนด์แบบ Dynamic vulcanization.....	11
รูปที่ 2.10 กลไกการเกิด (a) ปฏิกริยาโบรมิเนชันของ IIR และ (b) ปฏิกริยาการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ของ BIIR.....	13
รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของยาง IIR, CIIR และ BIIR .....	14
รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของ PP .....	15
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของ (a) HPP, (b) RPP และ (c) BPP .....	15
รูปที่ 2.14 โครงสร้างโมเลกุลของ EOC .....	16
รูปที่ 2.15 กลไกการสลายตัวของสารไดควิมิลเพอร์ออกไซด์ .....	19
รูปที่ 2.16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางโมเลกุลในระบบเพอร์ออกไซด์ .....	20
รูปที่ 2.17 กลไกการทำงานของสารโคเอเจนต์.....	21
รูปที่ 2.18 โครงสร้างทางเคมีของ TMPTMA.....	22
รูปที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง .....	31
รูปที่ 3.2 ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน JIS K 6301 Type 2.....	33
รูปที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง.....	33

รูปที่ 3.4 ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 624 (Die C).....	34
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์สำหรับทดสอบ Compression set.....	35
รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6480LV.....	36
รูปที่ 3.7 เครื่อง Colorimeter รุ่น NR110 ยี่ห้อ 3nh .....	37
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดสอบความสามารถในการคืนตัวกลับหลังแทงเข็ม .....	38
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบรอยร้าวในระบบสุญญากาศสำหรับใช้ทดสอบการคืนตัวกลับหลังแทงเข็ม ....	39
รูปที่ 3.10 เครื่อง Profile projector.....	39
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบวัดการซึมผ่านของแก๊ส รุ่น VAC-V2.....	40
รูปที่ 3.12 หลักการทดสอบ GTR แบบ Differential pressure method.....	41
รูปที่ 4.1 ความแข็งของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ.....	44
รูปที่ 4.2 (a) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และ (b) ระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาดของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ .....	45
รูปที่ 4.3 ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ.....	46
รูปที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การยุบตัวหลังได้รับแรงกดของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ .....	47
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ BIIR:PP:EOC .....	49
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (a) B65P10E25 และ (b) B65P10E25 TPV .....	52
รูปที่ 4.7 แบบจำลองการพัฒนาสัญญาณวิทยุของ B65P10E25 TPV (a) ก่อนเกิดการวัลคาไนเซชัน (b) ขณะเกิดวัลคาไนเซชัน และ (c) หลังสิ้นสุดกระบวนการวัลคาไนเซชัน.....	52
รูปที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของ B65P10E25 TPV ที่ผ่านกระบวนการหลอมขึ้นรูปซ้ำ.....	53
รูปที่ 4.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนสายโซ่ของพอลิโพรพิลีน.....	54
รูปที่ 4.10 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของ B65P10E25 TPV ตามจำนวนการหลอมขึ้นรูปซ้ำ ...	55
รูปที่ 4.11 ระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาดของ B65P10E25 TPV ตามจำนวนการหลอมขึ้นรูปซ้ำ.....	56
รูปที่ 4.12 หลอดทดสอบของตัวอย่างสูตรต่าง ๆ หลังทดสอบการรั่วหลังแทงเข็ม .....	58

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายรูที่เกิดขึ้นหลังแทงเข็มบนเครื่องวัดขนาดชนิดแสงเงาของตัวอย่าง (a) B65P35, (b) B65P30E5, (c) B65P25E10, (d) B65P20E15, (e) B65P10E25, (f) B65E35 และ (g) B65P10E25 TPV ที่กำลังขยาย 2x.....	60
รูปที่ 4.14 กลไกการซึมผ่านของโมเลกุลแก๊สผ่านพอลิเมอร์.....	61
รูปที่ 4.15 ค่า GTR ของตัวอย่างพอลิเมอร์เบลนด์ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และ B65P10E25 TPV.....	62



## สารบัญตาราง

### หน้า

ตารางที่ 1.1 สูตรการผสม BIIR, PP และ EOC ในหน่วย parts by weight percentage (wt%) ....	3
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในการคงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์ .....	18
ตารางที่ 2.2 ชนิดของสารโคเอเจนต์ .....	21
ตารางที่ 3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	25
ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกายภาพของยางโบรโมบิวทิลเกรด BB 2030 .....	26
ตารางที่ 3.3 สมบัติเชิงกลของยางโบรโมบิวทิลเกรด BB 2030.....	26
ตารางที่ 3.4 สมบัติทางกายภาพและทางกลของ PP เกรด Moplen RP348N.....	27
ตารางที่ 3.5 สมบัติทางกายภาพและทางกลของ EOC เกรด 8613L .....	28
ตารางที่ 3.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบการวิจัย .....	29
ตารางที่ 3.7 สูตรการผสมยางโบรโมบิวทิล (BIIR) พอลิพรพิลีน (PP) และเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (EOC) ในหน่วย parts by weight percentage (wt%) .....	30
ตารางที่ 3.8 สูตรการผสมยาง BIIR, PP และ EOC ในหน่วย Parts by weight percentage (wt%) .....	31
ตารางที่ 4.1 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ.....	46
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ B65P10E25 และ B65P10E25 TPV .....	51
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ $L^* a^* b^*$ ของ B65P10E25 TPV ที่ผ่านการขึ้นรูปซ้ำในรอบต่าง ๆ .	54
ตารางที่ 4.4 ค่า YI และ WI ของ B65P10E25 TPV ที่ผ่านการขึ้นรูปซ้ำในรอบต่าง ๆ .....	54
ตารางที่ 4.5 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของ B65P10E25 TPV ตามจำนวนการหลอมขึ้นรูปซ้ำ .....	56
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการรั่วหลังแทงเข็มของตัวอย่าง .....	58
ตารางที่ 4.7 ขนาดรูของขึ้นตัวอย่างหลังทดสอบการรั่วหลังแทงเข็ม.....	59
ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ P, D และ S ของตัวอย่างแต่ละสูตร.....	63

ตารางที่ 4.9 ราคาต้นทุนสูตรจุกปิดหลอดเก็บเลือดจากยางเทอร์โมเซต ..... 64

ตารางที่ 4.10 ราคาต้นทุนสูตรจุกปิดหลอดเก็บเลือดจาก TPV..... 65

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจุกปิดหลอดเก็บเลือดจากยางเทอร์โมเซตและ TPV ..... 65

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบสมบัติของจุกปิดหลอดเก็บเลือดจากเทอร์โมเซตและ TPV ตามมาตรฐาน  
ต่าง ๆ ที่กำหนด..... 67



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ยางโบรโมบิวทิล (Bromobutyl rubber, BIIR) เป็นยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติเด่นด้านการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำที่ดี ทนทานต่อกรดและด่าง และทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น โอโซน ความร้อน และความชื้น เป็นต้น ทำให้ยางชนิดนี้ถูกนำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนในอุปกรณ์ทางการแพทย์และเภสัชกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น ยางซีล ยางกันรั่ว จุกปิดขวดยาฉีด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในจุกปิดหลอดเก็บเลือด ซึ่งต้องการสมบัติในการรักษาความเป็นสุญญากาศภายในหลอดเก็บเลือดให้คงที่ตลอดอายุการจัดเก็บ และสามารถคืนตัวกลับหลังแทงเข็มได้ เพื่อป้องกันการรั่วไหลของตัวอย่างเลือดและการปนเปื้อนในขณะส่งตรวจห้องปฏิบัติการ ปัจจุบันต้นทุนการผลิตจุกยางชนิดนี้ค่อนข้างสูง เนื่องจากในกระบวนการผลิตใช้วิธีการวัลคาไนเซชันแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization) ซึ่งค่อนข้างใช้ระยะเวลาในหนึ่งรอบการผลิต (Cycle time) ตั้งแต่การเตรียมยางคอมพาวนด์ การเตรียมยางพรีฟอร์ม (Rubber preform) ก่อนนำไปขึ้นรูป ตลอดจนเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปยางเทอร์โมเซต (Thermoset rubber) ที่นานกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปแบบพลาสติก อีกทั้งยังมีโอกาสเกิดการปนเปื้อนในระหว่างการผลิตสูง นอกจากนี้ภายในสูตรยางคอมพาวนด์ยังมีการใช้สารเคมีหลากหลายชนิด เช่น สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) สารตัวเร่ง (Accelerator) สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aid) สารตัวเติม (Filler) และอื่น ๆ เป็นต้น ซึ่งสารเคมีเหล่านี้อาจถูกชะออกมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ในขณะจัดเก็บและปนเปื้อนไปกับตัวอย่างเลือดในขณะใช้งาน แล้วอาจส่งผลให้การตรวจวิเคราะห์เลือดเกิดความผิดพลาดได้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซต (Thermoplastic vulcanizate, TPV) จากยางโบรโมบิวทิลและพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) สำหรับใช้ผลิตจุกปิดหลอดเก็บเลือด เนื่องจาก TPV สามารถแสดงสมบัติยืดหยุ่นคล้ายอีลาสโตเมอร์ในช่วงอุณหภูมิการใช้งานได้ ในขณะที่ปริมาณการใช้สารเคมีในสูตรลดลง และยังสามารถนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนแล้วขึ้นรูปได้เหมือนเทอร์โมพลาสติก ซึ่งทำให้ระยะเวลาในการขึ้นรูปสั้นลง รวมถึงเศษของเสียที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตยังสามารถนำมาขึ้นรูปซ้ำใหม่ได้ (Reprocessing) งานวิจัยนี้ผู้วิจัยจำเป็นต้องศึกษาอัตราส่วนการผสมยางและเทอร์โมพลาสติกเพื่อให้ได้ความแข็ง (Hardness) เท่ากับความแข็งของจุกปิดหลอดเลือดทางการค้าที่มีค่าเท่ากับ 40-50 Shore A เนื่องจากการผสมระหว่าง BIIR และ PP ที่



อัตราส่วน BIIR:PP เป็น 65:35 มีค่าความแข็งค่อนข้างสูงและยังไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ผลิตเป็นจุดปิดหลอดเก็บเลือด ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (Ethylene octene copolymer, EOC) เข้ามาผสมร่วมกับ BIIR และ PP เพื่อปรับปรุงความแข็งของวัสดุให้ต่ำลง เนื่องจากสมบัติความแข็งนั้นส่งผลต่อแรงที่ต้องใช้แทงเข็มให้ทะลุผ่านได้ง่าย รวมถึงศึกษาสมบัติเชิงกลอื่น ๆ ได้แก่ ความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) ระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ความต้านทานต่อแรงฉีกขาด (Tear resistance) และความสามารถในการคืนตัวกลับหลังถูกกด (Compression set) เป็นต้น นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา การคืนตัวกลับหลังแทงเข็ม และอัตราการซึมผ่านแก๊สของวัสดุ ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการพัฒนา TPV เพื่อเป็นวัสดุทางเลือกใหม่ที่จะนำมาใช้แทนยางเทอร์โมเซตสำหรับใช้ผลิตจุดปิดหลอดเก็บเลือด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 พัฒนาเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซตจากยางโบรโมบิวทิลและพอลิโพรพิลีน
- 1.2.2 ทดสอบสมบัติเชิงกล การคืนตัวกลับหลังแทงเข็ม และอัตราการซึมผ่านแก๊สของวัสดุ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะศึกษาอัตราส่วนผสม BIIR, PP และ EOC โดยอัตราส่วน BIIR:PP:EOC ที่ศึกษาเป็น 65:35:0, 65:30:5, 65:25:10, 65:20:15, 65:10:25 และ 65:0:35 ตามลำดับ และเลือกอัตราส่วนที่มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 40-50 Shore A มาเตรียมเป็น TPV จากนั้นตัวอย่างแต่ละสูตรจะถูกทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ได้แก่ ความทนทานต่อแรงดึง ระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อแรงฉีกขาด และเปอร์เซ็นต์การยุบตัวหลังการถูกกด เป็นต้น รวมทั้งศึกษาการกระจายตัวและความเข้ากันได้ สมบัติหลังการนำมาหลอมขึ้นรูปใหม่ ความสามารถในการคืนตัวหลังแทงเข็ม และวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สของตัวอย่างแต่ละสูตร

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

ได้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซตที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี สามารถคืนตัวกลับหลังแทงเข็มได้ และมีอัตราการซึมผ่านแก๊สต่ำ เพื่อการประยุกต์ใช้เป็นจุดปิดหลอดเก็บเลือด

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาอัตราส่วนการผสม BIIR:PP:EOC เป็น 65:35:0, 65:30:5, 65:25:10, 65:20:15, 65:10:25 และ 65:0:35 ดังตารางที่ 1 เพื่อหาอัตราส่วนที่มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 40-50 Shore A (ความแข็งของจุกปิดหลอดเลือดทางการค้า)

**ตารางที่ 1.1** สูตรการผสม BIIR, PP และ EOC ในหน่วย parts by weight percentage (wt%)

Compositions	Functions	Formulation (wt%)					
		1	2	3	4	5	6
BIIR <sup>1</sup>	Rubber	65	65	65	65	65	65
RPP <sup>2</sup>	Thermoplastic	35	30	25	20	10	0
EOC <sup>3</sup>	Block copolymer	0	5	10	15	25	35

<sup>1</sup> Bromobutyl rubber, <sup>2</sup> Random polypropylene, <sup>3</sup> Ethylene-octene copolymer

1.5.2 เลือกสัดส่วนการผสม BIIR:PP:POE ที่มีค่าความแข็งที่เหมาะสมที่สุดมาเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซตในเครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer) ที่อุณหภูมิ 170°C ความเร็วโรเตอร์ (Rotor speed) 60 รอบต่อนาที (Revolutions per minute, rpm) และนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัดเบ้า (Compression molding machine) ที่อุณหภูมิ 160°C เพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบ

1.5.3 ทดสอบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ปรับปรุงได้ ดังนี้

1.5.3.1 ความแข็ง (Hardness) โดย Hardness durometer ตามมาตรฐาน JIS K 6253 Type A

1.5.3.2 ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืดสูงสุดที่จุดขาด (Elongation at break) โดยเครื่องทดสอบ Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน JIS K6301 Type 2

1.5.3.3 ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) ตามมาตรฐาน ASTM D 624 Type C

1.5.3.4 ความสามารถในการคืนตัวกลับหลังถูกกด (Compression set) ตามมาตรฐาน ASTM D395 Method B

1.5.4 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM)

1.5.5 ทดสอบสมบัติหลังผ่านการหลอมขึ้นรูปซ้ำ (Reprocessibility)

1.5.6 ทดสอบการคืนตัวกลับหลังแทงเข็ม (Self-sealing capacity) ในเครื่องทดสอบรอยรั่ว (Vacuum leak tester)

1.5.7 ทดสอบความสามารถในการรักษาความเป็นสุญญากาศ โดยวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊ส (Gas transmission rate, GTR) โดยเครื่องทดสอบการซึมผ่านของแก๊ส (Gas permeability tester)

1.5.8 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง จัดทำเนื้อหาและเล่มวิทยานิพนธ์



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

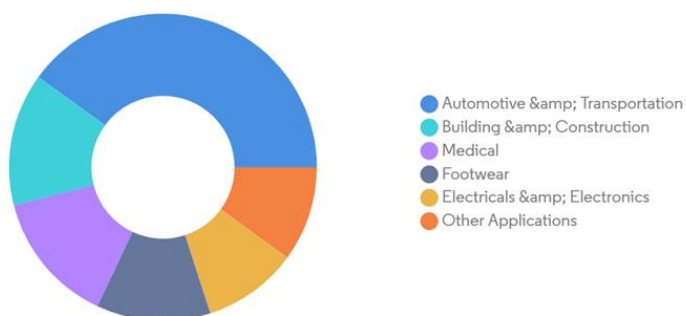
#### 2.1 เทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์

เทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer, TPE) เป็นวัสดุที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยรวมสมบัติที่ีระหว่างเทอร์มอพลาสติกและอีลาสโตเมอร์เข้าด้วยกัน ทำให้วัสดุที่ได้มีสมบัติ ยืดหยุ่นคล้ายยางที่อุณหภูมิห้อง และสามารถนำมาผ่านกระบวนการแปรรูปที่อุณหภูมิสูงแบบเทอร์-มอพลาสติกได้ [1] ทำให้วัสดุชนิดนี้ได้เปรียบกว่ายางเทอร์มอเซตในด้านกระบวนการผลิต เนื่องจากไม่ต้องเตรียมคอมพิวเตอร์หลายขั้นตอน ระยะเวลาในการขึ้นรูปสั้นกว่า และของเสียในกระบวนการผลิตสามารถนำกลับไปรีไซเคิลใหม่ได้ รวมถึงการใช้ TPE ทดแทนวัสดุอื่น ๆ ที่ไม่สามารถตอบสนองความต้องการสมบัติบางประการได้ เช่น ความอ่อนนุ่มที่ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคืองสำหรับผลิตภัณฑ์ ในกลุ่มเครื่องมือแพทย์ สมบัติการเชื่อมติดเองได้หลังแทงเข็มหลายครั้งบนจุดปิดยาฉีดยา และจุดปิด หลอดเก็บเลือดที่ต้องการความเป็นพิษต่ำและเข้ากันได้ดีกับเลือด เป็นต้น TPE เป็นวัสดุที่สามารถ ออกแบบสมบัติได้หลากหลายและครอบคลุมทุกแขนงการใช้งาน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผู้ผลิตใน ภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ เริ่มให้ความสนใจและเลือกที่จะนำ TPE มาใช้เป็นวัสดุดิบตั้งต้นในการขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จากข้อมูลการศึกษาของ Mordor Intelligence ระบุว่าอัตราการเติบโตของตลาด TPE ทั่วโลกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 5 ต่อปี ตั้งแต่ปี 2022 ไปจนถึงปี 2027 และจาก ข้อมูลในปี 2021 มีการใช้ TPE ในภาคอุตสาหกรรมยานยนต์มากที่สุด รองลงมาเป็นวัสดุก่อสร้างและ ตกแต่งอาคาร กลุ่มผลิตภัณฑ์เครื่องมือแพทย์ ชิ้นส่วนรองเท้า ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และอื่น ๆ เป็นต้น ดังแสดงในรูปแบบที่ 2.1 [2]

#### 2.2 ประเภทของเทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์

เทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถแบ่งตามวิธีการเตรียมได้เป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ เทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์แบบบล็อกโคพอลิเมอร์ (Block copolymer) และเทอร์มอพลาสติก อีลาสโตเมอร์เบลนด์ (Thermoplastic elastomer blends) ดังแสดงในรูปแบบที่ 2.2 [3]

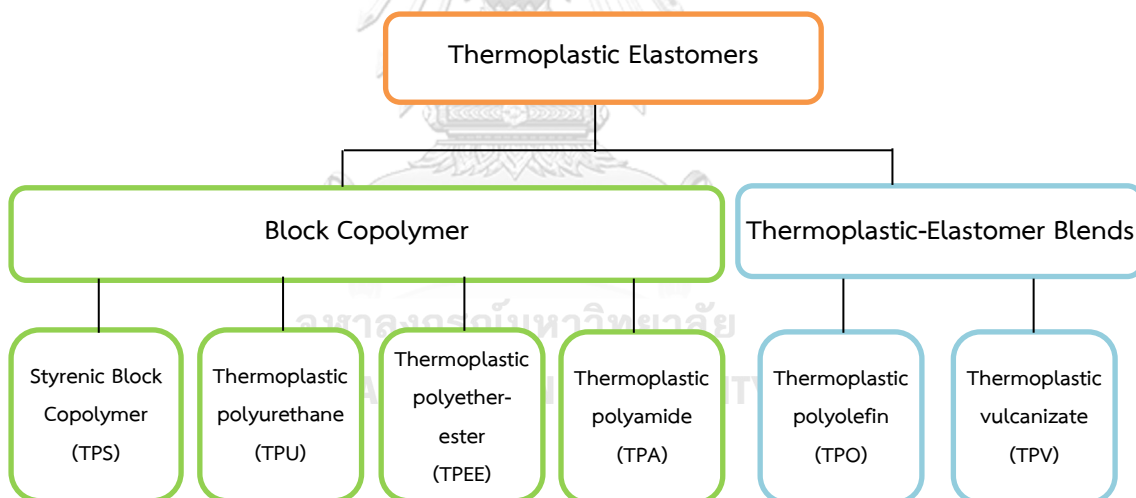
Thermoplastic Elastomer (TPE) Market, Volume (%), by Application, Global, 2021



Source: Mordor Intelligence



รูปที่ 2.1 สัดส่วนปริมาณการใช้ TPE ในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั่วโลก ปี 2021 [2]

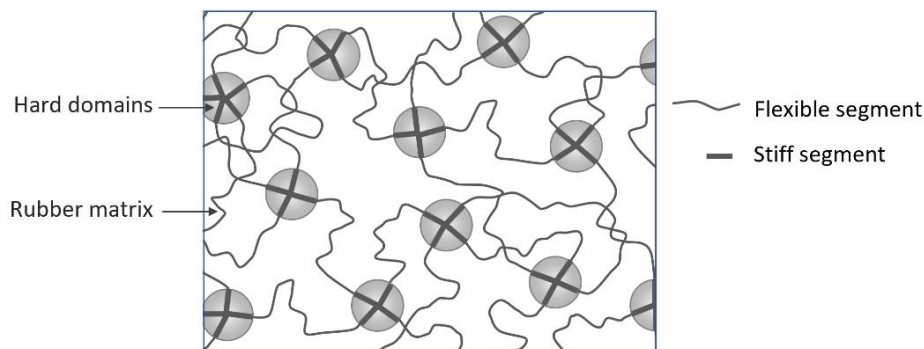


รูปที่ 2.2 แผนผังการจำแนกประเภทของเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์ [3]

### 2.2.1 เทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์แบบบล็อกโคพอลิเมอร์

TPE ชนิดแรกที่ถูกค้นพบเป็นแบบบล็อกโคพอลิเมอร์ (Block copolymer) ภายในโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแข็ง (Hard segment) ที่สายโซ่โมเลกุลจัดเรียงตัวเป็นกลุ่มก้อน (Hard domains) จะมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) สูง และส่วนอ่อน (Flexible segment) ที่สายโซ่โมเลกุลจัดเรียงตัวแบบอสัณฐาน

จะมีค่า  $T_g$  ต่ำ สามารถแสดงสมบัติยืดหยุ่นได้ที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยทั่วไปสมบัติของ TPE แบบบล็อกโคพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับปริมาณสัดส่วนของส่วนแข็งและส่วนอ่อน ชนิดของมอนอเมอร์ และอัตราส่วนของมอนอเมอร์ที่นำมาใช้สังเคราะห์ สามารถแบ่งชนิดของ TPE แบบบล็อกโคพอลิเมอร์ได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

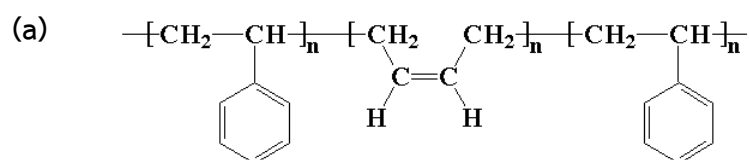


รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของเทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์แบบบล็อกโคพอลิเมอร์ [3]

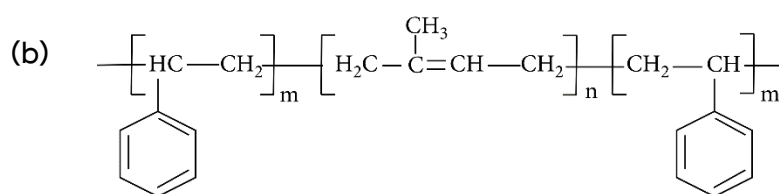
(1) บล็อกโคพอลิเมอร์ของสไตรีน (Styrenic thermoplastic elastomer, TPS) โครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) เป็นส่วนแข็ง และพอลิไดอีน (Polydiene) เป็นส่วนอ่อน ตัวอย่างของ TPS เช่น Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) Styrene-Isoprene-Styrene (SIS) และ Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene (SEBS) เป็นต้น ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.4 TPS จัดเป็นชนิดที่มีการผลิตและจำหน่ายมากที่สุด เนื่องจากมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) ที่อุณหภูมิห้อง แต่เนื่องจากเฟสที่แข็งเป็น PS จึงทำให้ TPS ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ และไม่ทนต่อตัวทำละลาย ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำจาก TPS ได้แก่ สายเคเบิล วัสดุอุดกันรั่ว สายยางทางการแพทย์ อุปกรณ์กีฬา ของเล่นเด็ก บรรจุก๊าซ และอื่น ๆ เป็นต้น

(2) เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethanes, TPU) โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยส่วนแข็งของพันธะยูรีเทนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไดไอโซไซยาเนตและสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และส่วนอ่อนเป็นพันธะเคมีของพอลิเอสเทอร์ (Polyester) หรือ พอลิอีเทอร์ (Polyether) ดังรูปที่ 2.5 TPU ชนิดนี้มีราคาสูง แต่มีจุดเด่นเรื่องความทนทานต่อแรงเสียดสีและการฉีกขาด จึงเหมาะสำหรับทำพื้นรองเท้า หรือทดแทนชิ้นส่วนยางชนิดอื่น

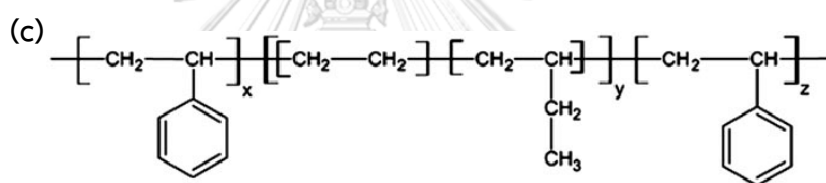
ที่ไม่ทนทานต่อการเสียดสี นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อุปกรณ์การแพทย์ ชิ้นส่วนยานยนต์ สายไฟ และสายเคเบิล เป็นต้น



Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)



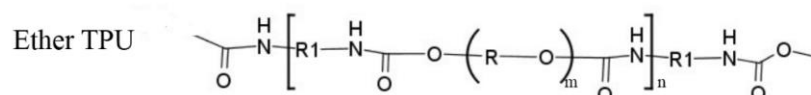
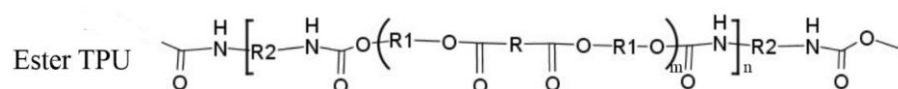
Styrene-Isoprene-Styrene (SIS)



Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene (SEBS)

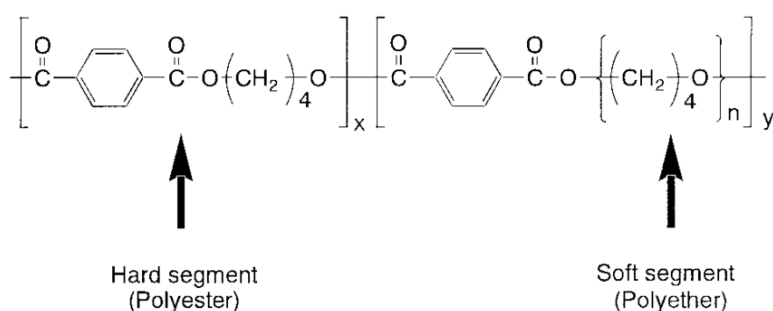
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ (a) SBS, (b) SIS และ (c) SEBS [3]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



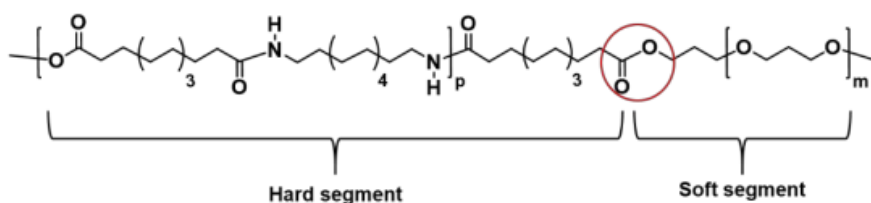
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ Ester-based TPU และ Ether-based TPU [3]

(3) เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ (Thermoplastic polyether-ester elastomers, TPEE) หรือ โคพอลิเอสเทอร์ (Copolyester, COPE) โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย ส่วนแข็งเป็นพอลิเอสเทอร์ที่มีวงแหวนเป็นองค์ประกอบ (Aromatic polyester) และส่วนอ่อนเป็นสายโซ่อิเทอร์ที่ไม่มีวงแหวน (Aliphatic polyester) ดังรูปที่ 2.6 TPEE มีความทนทานต่อสารเคมี และน้ำมันสูงและทนความร้อนได้สูงที่สุดถึง 140°C จึงนิยมใช้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ รองเท้าบูท สายเคเบิล และงานท่อทางอุตสาหกรรม เป็นต้น



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ TPEE [3]

(4) เทอร์มอพลาสติกพอลิเอไมด์ (Thermoplastic polyamides elastomer, TPE-A) หรือ โคพอลิเอไมด์ (Copolyamide, COPA) โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยบล็อกพอลิอีเทอร์เป็นส่วนอ่อนและบล็อกพอลิเอไมด์เป็นส่วนแข็ง ดังรูปที่ 2.7 TPE-A จัดเป็นเทอร์มอพลาสติกเชิงวิศวกรรมที่มีสมบัติทนความร้อนได้สูง ทนทานสารเคมี และต้านทานต่อการหักงอได้ดี นิยมนำไปใช้ผลิตชิ้นส่วนอากาศยาน (Aerospace)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของ TPE-A [3]

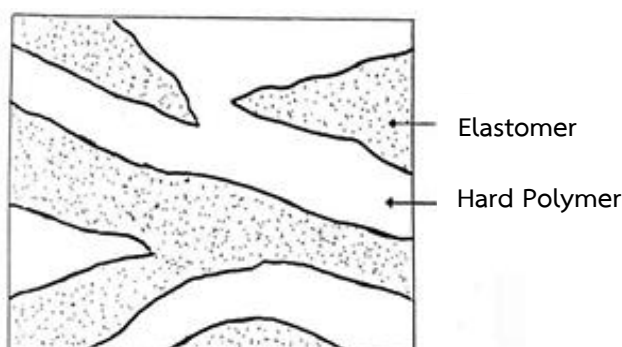


## 2.2.2 เทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์เบลนด์

การเตรียม TPE ด้วยเทคนิคการเบลนด์จะนำเทอร์มอพลาสติกมาเบลนด์กับอิลาสโตเมอร์ สามารถแบ่งได้ 2 วิธี คือ การเบลนด์แบบปกติ (Simple blend) จะได้เป็นเทอร์มอพลาสติกพอลิโอเลฟินส์ (Thermoplastic polyolefins, TPO) และการเบลนด์แบบไดนามิกส์วัลคาไนเซชัน (Dynamic vulcanization) จะได้เป็นเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต (Thermoplastic vulcanizate, TPV) เป็นต้น

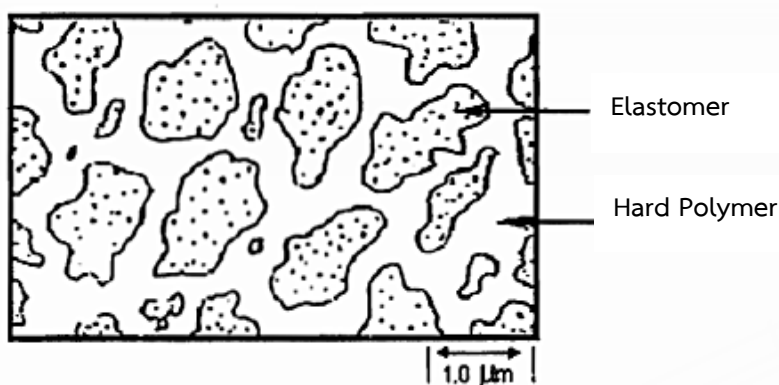
(1) เทอร์มอพลาสติกพอลิโอเลฟินส์ หรือ TPO เตรียมได้จากการเบลนด์แบบปกติ โดยการผสมเทอร์มอพลาสติกและอิลาสโตเมอร์เข้าด้วยกันในภาวะที่ให้แรงเฉือนและความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (Crystalline melting temperature,  $T_m$ ) ของเทอร์มอพลาสติก TPO ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคนี้จะมีโครงสร้างสัณฐานวิทยาแบบเฟสร่วม (Co-continuous phase) โดยเฟสต่อเนื่องของเทอร์มอพลาสติกและอิลาสโตเมอร์จะกระจายตัวซึ่งกันและกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 TPO จะมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิห้อง และสามารถหลอมขึ้นรูปได้เช่นเดียวกับเทอร์มอพลาสติก โดยสมบัติความแข็งแรงของวัสดุจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเฟสเทอร์มอพลาสติกที่เป็นเฟสแข็ง ส่วนสมบัติความยืดหยุ่นจะได้อาจมาจากเฟสของอิลาสโตเมอร์

ตัวอย่างของ TPO ที่ถูกใช้อย่างกว้างขวาง เช่น ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน หรือ ยางอีพีดีเอ็ม (Ethylene propylene diene rubber, EPDM) เบลนด์กับพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) หรือ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ซึ่งสามารถผสมเข้ากันได้ง่ายและมีราคาถูกกว่า TPU, SIS และ SBS อย่างไรก็ตาม TPO ที่ได้จากการบวนการเบลนด์แบบปกติมักมีปัญหาเรื่องความเสถียรของรูปร่างเมื่อมีความแข็งต่ำ เนื่องจากเฟสอ่อนของอิลาสโตเมอร์จะทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการไหลได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นเมื่อมีสัดส่วนของเฟสอิลาสโตเมอร์ใน TPO มากขึ้น จึงทำให้วัสดุเกิดการเสียรูปได้ง่าย



รูปที่ 2.8 สัณฐานวิทยาของ TPE ที่ได้จากการเบลนด์แบบปกติ [4]

(2) เทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต หรือ TPV เตรียมได้จากการผสมเทอร์มอพลาสติกและอีลาสโตเมอร์ที่มีการเติมสารวัลคาไนซ์ เพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางขึ้นในเฟสของอีลาสโตเมอร์ TPV จะมีความเสถียรในการคงรูปร่างมากกว่า TPO ที่ไม่มีการเติมสารวัลคาไนซ์ และจะแสดงสมบัติความเป็นอีลาสติก (Elasticity) คล้ายกับยางเทอร์มอเซต กระบวนการเบลนด์ TPV เพื่อให้เกิดการกลับเฟส (Phase inversion) เรียกว่า กระบวนการไดนามิกวัลคาไนเซชัน (Dynamic vulcanization) โดยขณะทำการผสมที่อุณหภูมิหลอมเหลวของเทอร์มอพลาสติกจะให้แรงเฉือนสูงควบคู่ไปกับการเกิดวัลคาไนเซชันในเฟสยาง ซึ่งในขณะนั้นความหนืดของเฟสยางจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดที่ความหนืดของเฟสยางและเทอร์มอพลาสติกแตกต่างกันมาก เฟสของยางจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการแตกออกเป็นอนุภาคเล็ก ๆ กระจายในเฟสต่อเนื่องของเทอร์มอพลาสติก ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดภายใต้ภาวะที่มีแรงเฉือนและแรงตึงผิวสูง เพื่อป้องกันการกลับมารวมตัวของอนุภาคยางเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ (Agglomeration) โดยลักษณะสัณฐานวิทยาของ TPV ประกอบด้วยเฟสยางที่ถูกวัลคาไนซ์กระจายอยู่ในเมทริกซ์ของเฟสเทอร์มอพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ TPV ที่ได้จากการเบลนด์แบบ Dynamic vulcanization [4]

### 2.3 ความเข้ากันได้ของการเบลนด์

การเบลนด์พอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป สิ่งที่จะต้องพิจารณา คือ ความเข้ากันได้ขององค์ประกอบที่นำมาเบลนด์ เนื่องจากพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีโครงสร้างและความเป็นขั้วที่แตกต่างกัน พอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสมเข้ากันไม่ดีจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ลดลง และเมื่อนำไปสัมผัสกับตัวทำละลายจะเกิดการแทรกซึมผ่านได้ง่าย โดยความไม่เข้ากันระหว่างเฟสมาจาก 3 ปัจจัยหลัก ดังนี้

1. ความไม่เข้ากันด้านความหนืด (Viscosity incompatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม ถ้าความหนืดของคู่เบลนด์มีความแตกต่างกันมากจะได้พอลิเมอร์เบลนด์ที่เข้ากันไม่ได้ แต่ในขั้นตอนการผสมสามารถปรับปรุงได้โดยการปรับอัตราส่วนของความหนืดของแต่ละองค์ประกอบโดยการผสมของน้ำมันหรือสารตัวเติม หรือการให้แรงเฉือนหรือความร้อนกับพอลิเมอร์ที่มีความหนืดมากก่อนนำมาผสม เพื่อปรับปรุงความหนืดเริ่มต้นของพอลิเมอร์ให้ใกล้เคียงกัน

2. ความไม่เข้ากันทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic incompatibility) ค่าพลังงานพื้นผิว (Surface energy) ของพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมเข้าด้วยกันจำเป็นต้องมีความแตกต่างกันไม่มาก เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดพอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากกว่าเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน และมีแรงยึดติดระหว่างเฟสเพียงพอ

3. ความไม่เข้ากันทางอัตราการคงรูป (Cure rate incompatibility) เนื่องจากพอลิเมอร์แต่ละชนิดนั้นมีพลังงานกระตุ้น หรือ พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ที่จะทำให้เกิดกระบวนการวัลคาไนเซชันที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดการคงรูปในช่วงเวลาที่ต่างกัน นอกจากนี้การกระจายตัวของสารเคมีโดยเฉพาะสารตัวเร่งหรือสารที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ที่ไม่สม่ำเสมอ ก็จะส่งผลให้เกิดความไม่เข้ากันได้

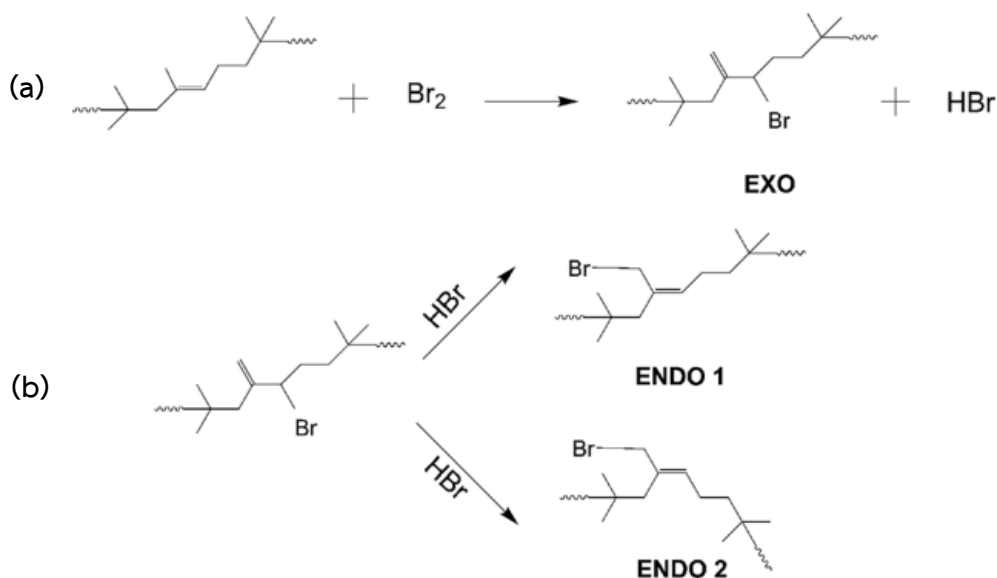
การผสมให้ได้คุณลักษณะและสมบัติเชิงกลของ TPE ที่ดีจึงต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม รวมถึงปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความหนืดของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม ความเร็วของแรงเฉือน ชนิดของเครื่องผสม ระยะเวลาในการผสม องค์ประกอบของพอลิเมอร์เบลนด์ และแรงตึงผิว เป็นต้น [5]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 2.4 ยางโบรโมบิวทิล

ยางโบรโมบิวทิล (Bromobutyl rubber, BIIR) เป็นยางสังเคราะห์ที่ได้จากการปรับปรุงยางบิวทิล (Regular butyl rubber, IIR) โดยนำมาผ่านปฏิกิริยาฮาโลจิเนชัน (Bromination) กับแก๊สโบรมีน ( $Br_2$ ) เมื่ออะตอมของโบรมีนเข้าใกล้พันธะคู่ของไอโซพรีนจะเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ไฮโดรเจนที่ติดกับคาร์บอนชนิดตติยภูมิ (Tertiary carbon) และพันธะคู่จะเคลื่อนที่จากตำแหน่งบนสายโซ่หลักไปยังตำแหน่งนอกสายโซ่หลักแทน โดยโบรโมบิวทิลที่ได้จากปฏิกิริยานี้จะมีโครงสร้างแบบ Exo-methylene allyl และจะได้กรดไฮโดรโบรมิก (Hydrobromic acid, HBr) เกิดขึ้นในระบบ ดังรูปที่ 2.10 (a) เมื่อในระบบมีความร้อนและ HBr อยู่ จะทำให้โบรโมบิวทิลเกิดปฏิกิริยาการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ (Rearrangement reaction) เปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างแบบ Endo-bromomethyl

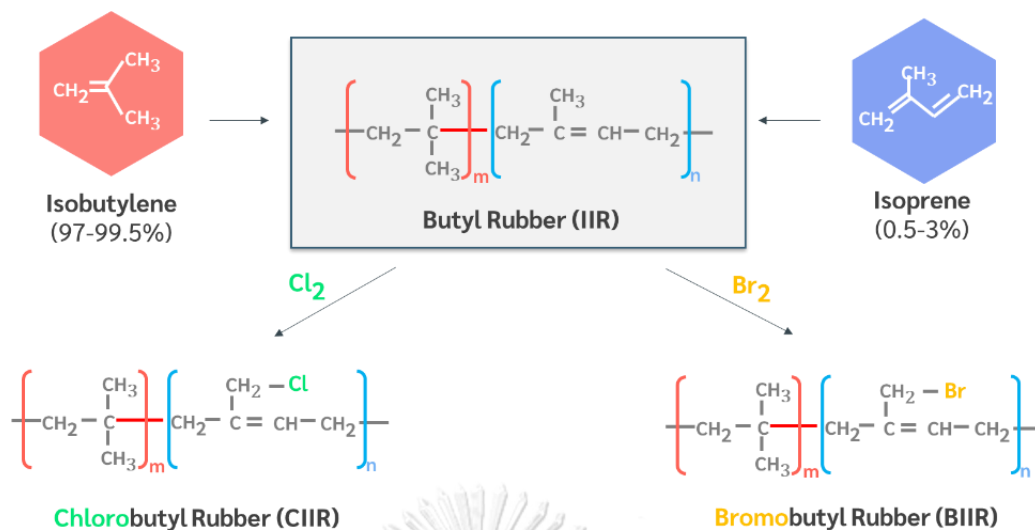
olefinic bromide โดยพันธะคู่จะย้ายไปเกิดบนสายโซ่หลักของหน่วยไอโซพรีน และอะตอมของโบรมีนที่ต่อกับ Tertiary carbon จะย้ายไปต่อกับหมู่เมทิลแทน แสดงดังในรูปที่ 2.10 (b)



รูปที่ 2.10 กลไกการเกิด (a) ปฏิกริยาโบรมิเนชันของ IIR และ (b) ปฏิกริยาการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ของ BIIR [6]

BIIR จะมีค่า  $T_g$  ประมาณ  $-50$  องศาเซลเซียส และมีปริมาณโบรมีนอยู่ 1.9-2.1% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณฮาโลเจนอยู่น้อยมาก ดังนั้นยางชนิดนี้จึงจัดอยู่ในกลุ่มยางที่ไม่มีขั้ว นอกจากนี้การมีฮาตูลฮาโลเจนอยู่ในโครงสร้างยังทำให้พันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลยางมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันสูงชัน และ BIIR ยังมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่ายางคลอโรบิวทิล (Chlorobutyl rubber, CIIR) โครงสร้างสูตรของยาง IIR, CIIR และ BIIR แสดงดังรูปที่ 2.11 [7]

เนื่องด้วยสมบัติของยาง BIIR มีความต้านทานการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำที่ดี จึงถูกนำไปใช้ในการผลิตยางโอริง ประเก็นยางที่ต้องการความทนทานต่อสารเคมี ท่อไอน้ำ สายพาน นอกจากนี้ยังนิยมนำไปผลิตจุกปิดภาชนะทางการแพทย์และเภสัชกรรม เช่น จุกปิดยาฉีด และจุกปิดหลอดเก็บเลือด แต่ข้อเสียของยาง BIIR คือ ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นปลอกหุ้มสายไฟ เนื่องจากมีเกลือที่ละลายน้ำได้ ได้แก่ เกลือโบรมีน ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาการรูปที่หลงเหลืออยู่เล็กน้อย โดยจะส่งผลให้ยางมีความเป็นฉนวนต่ำ



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของยาง IIR, CIIR และ BIIR [8]

## 2.5 พอลิโพรพิลีน

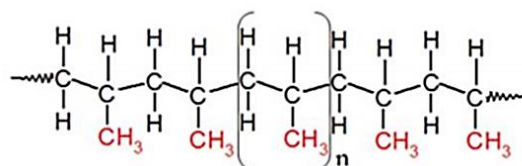
พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) มีโครงสร้างทางเคมีทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.12 PP เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นในกลุ่มเทอร์มอพลาสติก มีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) เตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบลูกโซ่ (Chain polymerization) ของโพรพีน (Propene) โดยทั่วไป PP สามารถจำแนกชนิดได้ตามรูปแบบการจัดเรียงตัวและชนิดของมอนอเมอร์ที่อยู่บนสายโซ่ของพอลิโพรพิลีนได้ 3 ประเภท (รูปที่ 2.13) ดังนี้ [9]

(1) โฮโมพอลิเมอร์ของ PP (Homopolymer PP, HPP) จะประกอบด้วยมอนอเมอร์ของโพรพีนเพียงชนิดเดียว

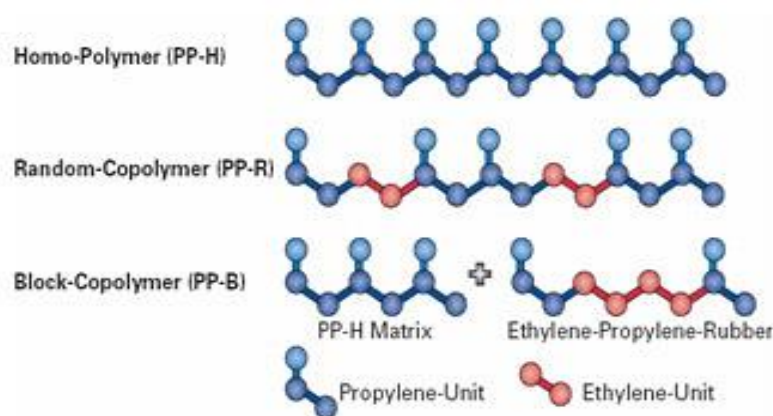
(2) โคพอลิเมอร์แบบสุ่มของ PP (Random copolymer, RPP) ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันระหว่างแก๊สเอทิลีนและโพรพีน โดยหน่วยของเอทิลีนจะเป็นส่วนประกอบและอยู่บนสายโซ่ของพอลิโพรพิลีนประมาณร้อยละ 6 ของน้ำหนักทั้งหมด และอยู่บนสายโซ่พอลิโพรพิลีนแบบสุ่ม ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งงานที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูง ใส ความแข็งต่ำกว่า HPP และทนต่อแรงกระแทกได้ดี

(3) โคพอลิเมอร์แบบบล็อกของ PP (Block copolymer PP, BPP) จะมีมอนอเมอร์ของเอทิลีนอยู่บนสายโซ่ของพอลิโพรพิลีนในปริมาณร้อยละ 5-15 ของน้ำหนักทั้งหมด โดยหน่วยของเอทิลีนจะเป็นมอนอเมอร์ร่วม (Co-monomer units) และจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบบนสายโซ่ของพอลิโพรพิลีน จึงทำให้ PP ชนิดนี้มีความเหนียวสูงและยืดหยุ่นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ RPP

นอกจากนี้ PP ทั้ง 3 ชนิดยังแสดงสมบัติเด่นด้านอื่น ๆ เช่น ทนต่อความร้อนเมื่อนำไปผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำ สามารถนำไปผลิตเป็นภาชนะใส่อาหารร้อนได้ ทนทานต่อสารเคมี ทนต่อแรงกระแทกแม้ในอุณหภูมิต่ำ ไม่แตกหักง่าย น้ำหนักเบา ไม่ดูดซึมน้ำ และสามารถนำกลับมาหลอมเหลวและผ่านกระบวนการรีไซเคิลใหม่ได้ [10]



รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของ PP [9]

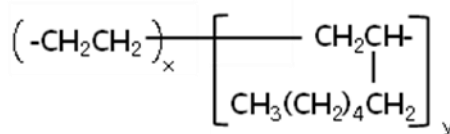


รูปที่ 2.13 โครงสร้างของ (a) HPP, (b) RPP และ (c) BPP [11]

## 2.6 เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์

เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (Ethylene-octene copolymer, EOC) ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัทดาวเคมีคอล (Dow Chemical Company) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเมทาโลซีน (Metallocene catalyst) โครงสร้างทางเคมีของ EOC แสดงดังรูปที่ 2.14 EOC นิยมนำไปใช้ผสมกับพอลิเมอร์ที่มีความทนต่อแรงกระแทกต่ำเพื่อเพิ่มสมบัติทางด้านความเหนียวให้กับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เช่น PE และ PP เพราะมีความคล้ายคลึงกันในโครงสร้างทางเคมี จึงสามารถผสมเข้ากันได้ดี อีกทั้งสามารถปรับปรุงสมบัติด้านการไหล (Rheology) เช่น พฤติกรรมการไหลแบบเชียร์ทินนิง (Shear thinning)

และความสามารถในการขึ้นรูปแบบหลอมเหลว (Melt processability) เป็นต้น [12] นอกจากนี้ EOC ยังอยู่ในลักษณะที่เป็นเม็ด ซึ่งสะดวกต่อการบรรจุและขนส่ง



รูปที่ 2.14 โครงสร้างโมเลกุลของ EOC [13]

## 2.7 สารเชื่อมขวางโมเลกุลพอลิเมอร์

ในกระบวนการวัลคาไนเซชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์หรืออิลาสโตเมอร์เปลี่ยนสภาพจากเทอร์มอพลาสติกไปเป็นเทอร์มอเซตที่มีโครงสร้างแบบตาข่ายหรือเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุล โดยการเติมสารเชื่อมขวางโมเลกุล หรือ สารวัลคาไนซ์ ส่งผลให้วัสดุที่ได้มีสมบัติเชิงกลและความเป็นอิลาสติกที่ดียิ่งขึ้น

สารเชื่อมขวางโมเลกุลพอลิเมอร์ที่ใช้ทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ ระบบที่ใช้กำมะถัน (Sulfur) ระบบที่ใช้สารที่ให้กำมะถัน (Sulfur donor) และสารเคมีอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน เช่น โลหะออกไซด์ ฟีนอลิกเรซิน และสารกลุ่มเพอร์ออกไซด์ (Peroxide) เป็นต้น [14]

### 2.7.1 ระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยกำมะถัน

ระบบการเชื่อมขวางด้วยสารกำมะถันมักนิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีราคาถูกทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าระบบการเชื่อมขวางอื่น ๆ อย่างไม่ค่อยมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความทนทานต่อแรงดึงสูง ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดและการล้าที่ดี และมีสมบัติในการต้านทานการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำที่ดีมาก ในขณะที่สมบัติการต้านทานต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน และสมบัติการคืนตัวเมื่อได้รับแรงกดอัดจะต่ำกว่าการเชื่อมขวางในระบบอื่น ๆ การเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยระบบกำมะถันมีข้อจำกัดคือ ในการผสมสูตรต้องใช้สารเคมีหลายชนิด อย่างเช่น สารตัวเร่งปฏิกิริยา และสารกระตุ้นปฏิกิริยา ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ผลิตในกลุ่มเครื่องมือแพทย์หรือเภสัชกรรมที่ต้องไม่ปนเปื้อนสารเหล่านี้ในปริมาณที่มากเกินไปค่าควบคุม นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีสีเหลือง จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานที่ต้องการแต่งสีส้น และระบบนี้ยังใช้ได้กับยางหรือพอลิเมอร์ที่มีพันธะคู่เท่านั้น เช่น ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์พอลิไอโซพรีน (Synthetic polyisoprene, IR) ยางบิวตะไดอีน (Butadiene rubber, BR) ยางสไตรีนบิวตะไดอีน (Styrene-butadiene rubber, SBR) ยางอะครีโลไนไตรล์บิวตะไดอีน

(Acrylonitrile-butadiene rubber, NBR) ยางไอโซพรีนไอโซพรีน (Isobutylene isoprene rubber, IIR) และอื่น ๆ เป็นต้น

### 2.7.2 ระบบการเชื่อมขวางด้วยสารที่ให้กำมะถัน

สารที่ให้กำมะถัน (Sulfur donor) หมายถึง สารที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง และสามารถสลายตัวให้กำมะถันได้ที่อุณหภูมิของการคงรูป มักเป็นสารกลุ่มตัวเร่ง เช่น เตตระเมทิลไธยูเรียมไดซัลไฟด์ (Tetramethyl thiuram disulphide, TMTD) ไดมอร์ฟอลินไดซัลไฟด์ (Dimorpholine disulphide หรือ Dithiodimorpholine, DTDM) และไดเพนตะเมทิลไธยูเรียม-เตตระซัลไฟด์ (Dipentamethylene thiuram tetrasulphide, DPTT) เป็นต้น การใช้สารที่ให้กำมะถัน จะใช้ร่วมกับกำมะถันในปริมาณเล็กน้อย คือใช้กำมะถันต่ำกว่า 1 phr ร่วมกับสารที่ให้กำมะถันประมาณ 3-4 phr หรือบางกรณีอาจไม่ใช้กำมะถันเลย โครงสร้างของการเชื่อมโยงโมเลกุลที่เกิดขึ้นจะมีประสิทธิภาพดีกว่าการเชื่อมโยงโมเลกุลโดยระบบที่ใช้กำมะถันตามปกติ และไม่เกิดปัญหาการบวมที่ผิวยาง เนื่องจากไม่มีกำมะถันส่วนเกิน ช่วยให้เกิดความปลอดภัยในกระบวนการผลิต โดยไม่เกิดการคงรูปก่อนกำหนด และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูงกว่า และให้มอดูลัสสูงกว่าการใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียวในปริมาณเท่ากัน แต่การใช้สารที่ให้กำมะถันจะมีราคาแพงกว่าการใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียว เพราะสารนี้มีราคาแพงกว่ากำมะถันธรรมดา และต้องใช้ในปริมาณที่มากกว่าการใช้กำมะถัน

### 2.7.3 ระบบการเชื่อมขวางด้วยสารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน

(1) โลหะออกไซด์ (Metallic oxides) ซึ่งได้แก่ พังค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) ตะกั่วออกไซด์ (Lead oxide, PbO) ซึ่งจะใช้ในการวัลคาไนซ์ได้กับยางบางชนิดเท่านั้น เช่น พังค์ออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ ใช้วัลคาไนซ์ยาง Neoprene (CR) แมกนีเซียมออกไซด์ ใช้วัลคาไนซ์ยาง Fluoroelastomer (FPM) และตะกั่วออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ ใช้วัลคาไนซ์ยางไฮพาลอน (CSM) เป็นต้น

(2) ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) เป็นเรซินที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาควบแน่นระหว่างฟีนอลและฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้กรดหรือเบสเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งฟีนอลิกเรซินเป็น 2 ชนิด คือ รีโซลเรซิน (Resole resin) และโนโวแลกเรซิน (Novolac resin) ซึ่งรีโซลเรซินจะใช้เป็นสารวัลคาไนซ์สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการนำไปใช้งานภายใต้สภาวะที่ได้รับความร้อนหรือความดันไอสูง ๆ เช่น ถังลมนิรภัย และยางเทอร์โมพลาสติก ส่วนโนโวแลกเรซิน



จะใช้เป็นสารที่ช่วยทำให้ยางเหนียวติดดีขึ้น ซึ่งถ้าโนโวแลกเรซินถูกทำให้เกิดการเชื่อมขวางด้วยเรซินที่ให้หมู่เมทิลีน โนวาแลกเรซินที่ได้จะทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงให้แก่ยาง ส่วนข้อเสียของสารฟีนอลิกเรซิน คือ ราคาแพงและต้องใช้ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับการวัลคาไนซ์ด้วยสารกลุ่มอื่น ๆ

(3) สารเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) สามารถใช้กับพอลิเมอร์ที่มีพันธะคู่และไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลได้ เช่น ยางซิลิโคน และพวกที่ไม่อิ่มตัว หรือพวกที่ไม่ไวต่อการปฏิกิริยาของรูป สารเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้กับยางควรเป็นสารที่มีความเสถียรที่จะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน มีความว่องไวพอสมควรในการทำปฏิกิริยากับยางที่อุณหภูมิของการคงรูป และมีความปลอดภัยในการใช้ เช่น สารไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) และสารเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) เป็นต้น ซึ่งข้อดีและข้อเสียในการคงรูปด้วยระบบเปอร์ออกไซด์แสดงในตารางที่ 2.1

เนื่องด้วยข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์จุกปิดทางการแพทย์หรือเภสัชกรรมมีการจำกัดปริมาณการปนเปื้อนของสารโลหะหนักและกำมะถัน ซึ่งพบว่าสารเหล่านี้มักถูกใช้เป็นสารเคมีตั้งต้นในกระบวนการวัลคาไนเซชันระบบกำมะถัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ระบบการวัลคาไนเซชันด้วยเปอร์ออกไซด์แทน เนื่องจากมีราคาถูก ไม่ต้องใช้สารโลหะหนักและกำมะถันในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ และลดความเป็นพิษจากการใช้สารเคมีให้ต่ำลง

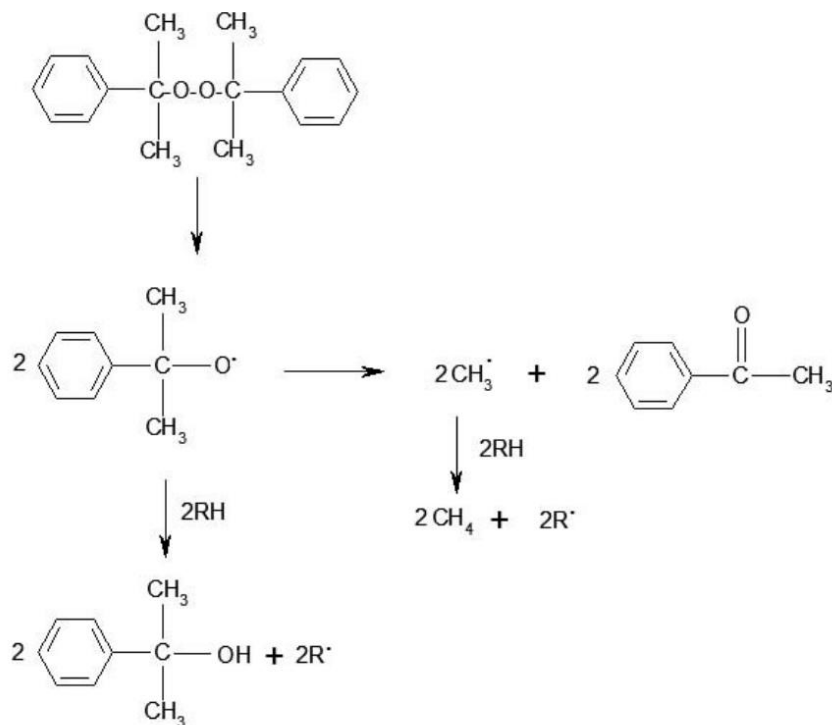
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในการคงรูปด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ [15]

ข้อดีของระบบเปอร์ออกไซด์	ข้อเสียของระบบเปอร์ออกไซด์
- ไม่เกิดการบวม (Bloom) ของสารเคมี	- ไม่เหมาะกับการคงรูปยางที่ใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน
- ยางไม่เกิดการเปลี่ยนสี โดยเฉพาะยางใส เมื่อสัมผัสกับแสง UV	- เกิดการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ทำให้เกิดการตัดสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพ
- สามารถใช้เปอร์ออกไซด์ในการคงรูปร่วม (Covulcanization) ระหว่างยางกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ได้ง่าย	- เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีชนิดอื่นได้ง่าย ทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์
- สมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดต่ำ	
- ทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน	
- มีความเป็นพิษต่ำ เนื่องจากไม่ต้องใช้สารกระตุ้นกลุ่มโลหะออกไซด์และกำมะถัน	

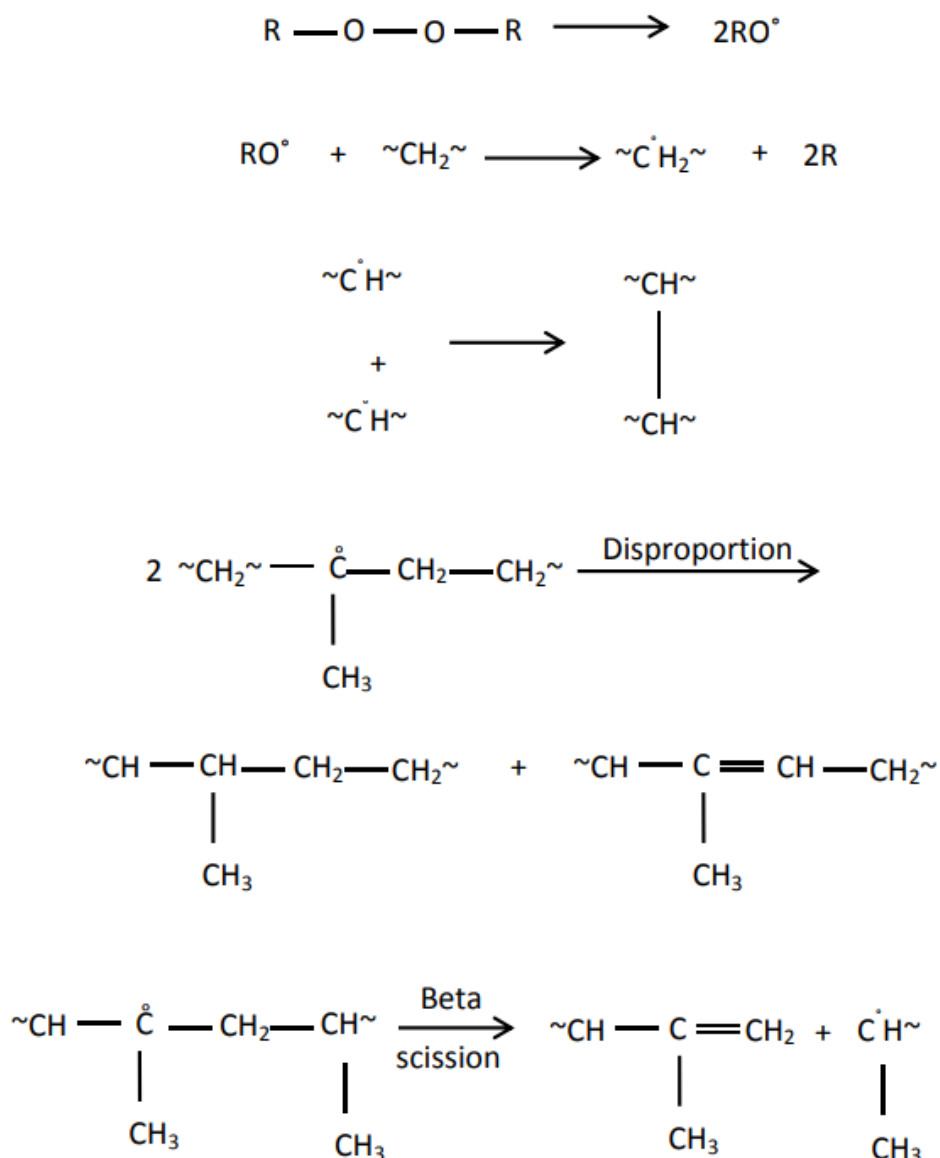
## 2.8 ระบบการเชื่อมขวางด้วยเพอร์ออกไซด์

### 2.8.1 กลไกการเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยเพอร์ออกไซด์

กลไกการเกิดวัลคาไนเซชันด้วยเพอร์ออกไซด์ เริ่มจากการที่สารเพอร์ออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานภายนอก เช่น ความร้อน แสงแดด และ UV และเกิดการสลายตัว (Decomposition) กลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) โดยโครงสร้างและกลไกการสลายตัวของสารไดควิมิลเพอร์ออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 2.15 จากนั้นอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยาบนสายโซ่พอลิเมอร์ที่ตำแหน่งพันธะคู่และเกิดเป็นอนุมูลอิสระบนสายโซ่พอลิเมอร์ (Polymer radical) เมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระ 2 โมเลกุลมารวมตัวกัน จะเกิดพันธะเชื่อมขวางขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุล ซึ่งเป็นพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน (C-C bond) นอกจากนี้ในระบบยังเกิดปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ (Beta scission) ของพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอน ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สั้นลง ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดแข่งขันกับปฏิกิริยาเชื่อมขวาง [18] ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 กลไกการสลายตัวของสารไดควิมิลเพอร์ออกไซด์ [17]



รูปที่ 2.16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางโมเลกุลในระบบเพอร์ออกไซด์ [18]

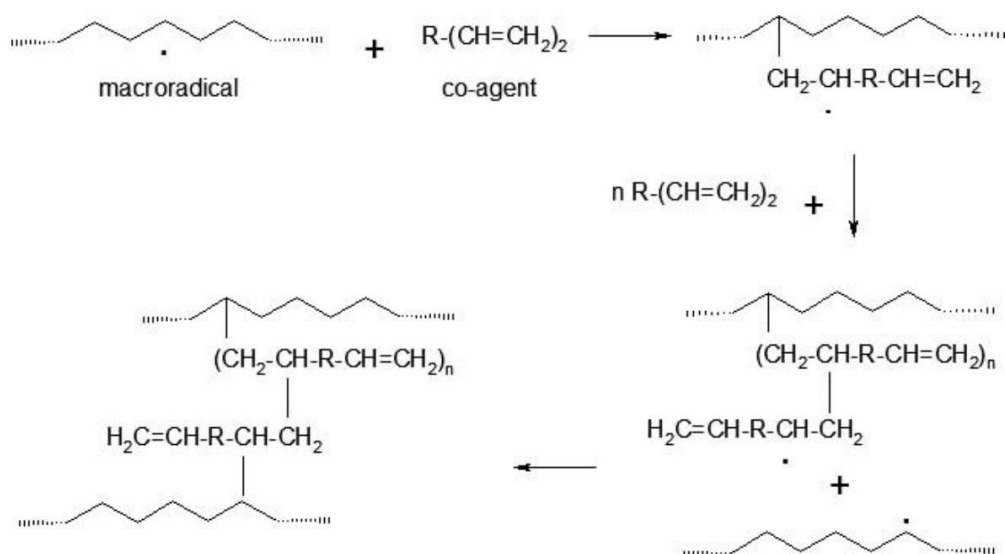
### 2.8.2 การใช้สารโคเอเจนต์ในระบบการเชื่อมขวางด้วยเพอร์ออกไซด์

สารเคมีช่วยปฏิกิริยาร่วม หรือ สารโคเอเจนต์ (Co-agent) เป็นสารที่มีโมเลกุลเป็นแบบ Multi-functional organic ที่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระสูง ซึ่งเมื่อถูกใช้ในระบบระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมขวางให้ดีขึ้น โดยจะลดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพของสายโซ่พอลิเมอร์จากการชนของอนุมูลอิสระ ชนิดของสารโคเอเจนต์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ สารโคเอเจนต์ Type I และสารโคเอเจนต์ Type II ดังแสดงใน

ตารางที่ 2.2 โดยสารโคเอเจนต์ Type I เป็นชนิดที่มีขั้ว มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และในโครงสร้างมีพันธะคู่อยู่ ซึ่งการใช้สารโคเอเจนต์ชนิดนี้จะได้เร่งอัตราเร็วของการเกิดวัลคาไนซ์ แต่จะเพิ่มความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางในระบบให้มากขึ้น ส่วนสารโคเอเจนต์ Type II จะมีความเป็นขั้วน้อยกว่า ซึ่งจะช่วยเสริมทั้งอัตราเร็วของการเชื่อมขวางและปริมาณพันธะเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น โดยหลักการทำงานของสารโคเอเจนต์จะแสดงดังรูปที่ 2.17

ตารางที่ 2.2 ชนิดของสารโคเอเจนต์ [19]

Type I Co-agents	Type II Co-agents
Ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA)	Diallyl phthalate (DAP)
Zinc acrylate (ZDA)	Triallyl isocyanurate (TAIC)
Zinc methacrylate (ZDMA)	Triallyl cyanurate (TAC)
N,N0-m-phenylenedimaleimide (PDM)	Divinylbenzene (DVB)
Trimethylolpropane trimethacrylate (TMPTMA)	Triallylphosphate (TAP)
Pentaerythritol triacrylate (PETRA)	High-vinyl 1,2-polybutadiene (HVPBD)



รูปที่ 2.17 กลไกการทำงานของสารโคเอเจนต์ [20]



สมบัติความยืดหยุ่นและระยะการยืดสูงสุดเพิ่มขึ้น เนื่องจากภายในโครงสร้างของ EOC ที่มีส่วนที่เป็นผลึก 7 wt% และส่วนอสัณฐาน 93 wt% จึงทำให้มีสมบัติความเป็นอีลาสติคที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อเพิ่มปริมาณ PP มากกว่า 30 wt% จะให้ความอดุลัสที่สูงขึ้น แต่สมบัติความยืดหยุ่นลดลง

M. Choi และคณะ [24] ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของวัสดุเทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่สามารถจดจำรูปร่างได้ (Shape memory thermoplastic elastomer) จากการเบลนด์ EOC ร่วมกับ Polyamide-12 (PA-12) พบว่าปฏิกิริยาการกราฟต์ของ EOC ลงบนสายโซ่ของ PA-12 สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการผสม ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ส่งเสริมความเข้ากันได้ของคู่เบลนด์ อีกทั้งวัสดุที่ได้ยังมีความสามารถในการคืนรูปเกือบ 100% หลังจากถูกนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการหลอมผลึก (Crystalline melting temperature:  $T_m$ ) ของ EOC

M. C. G. Rocha และคณะ [25] ศึกษาผลของการเติม EOC ในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) และยางปูพื้น (Ground tire rubber: GTR) ที่อัตราส่วน LLDPE/GTR/EOC เป็น 50/0/50, 50/25/25, 50/35/15, 50/45/5 และ 50/50/0 โดยศึกษาเกรดของ EOC ที่มีปริมาณของออกทินเป็น 20 wt%, 30 wt% และ 38 wt% พบว่า EOC ที่มีปริมาณ 30 wt% ช่วยเพิ่มสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) และจากผลการวิเคราะห์ DMA พบว่าพิก  $T_g$  ของ GTR และ LLDPE ขยับเข้าใกล้กันมากขึ้นหลังจากมีการเบลนด์ EOC ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น บ่งชี้ว่า EOC ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) ระหว่าง LLDPE และ GTR

R. Babu และคณะ [26] ศึกษาอัตราส่วนการผสม PP/EPDM และ PP/EOC พบว่าเมื่อสัดส่วนของเฟสอ่อน ได้แก่ EPDM หรือ EOC มีปริมาณน้อยกว่าเฟสแข็งของ PP จะแสดงสัณฐานวิทยาที่เฟสของ EPDM หรือ EOC เป็นอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องของ PP ในขณะที่เมื่อสัดส่วนของ PP/EPDM และ PP/EOC เท่ากัน (50/50 wt%) จะได้สัณฐานวิทยาที่เป็นเฟสต่อเนื่องร่วม (Co-continuous morphology) นอกจากนี้ PP/EOC ยังมีสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า PP/EPDM เนื่องจาก EOC มีโครงสร้างทางเคมีพื้นฐานและน้ำหนักโมเลกุลที่ใกล้เคียงกับ PP ทำให้สามารถผสมเข้ากับ PP ได้ดีและง่ายกว่า EPDM

X. Yan และคณะ [27] วิเคราะห์พฤติกรรมความเปราะเหนียว (Brittle-ductile behavior) ของ PP/EOC blends ที่สัดส่วนการผสมต่าง ๆ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EOC จะช่วยปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ของวัสดุให้สูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคของ EOC ซึ่งเป็น

พอลิเมอร์ที่ยืดหยุ่นและมีการกระจายตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กในเมทริกซ์ PP ซึ่งโครงสร้างการกระจายตัวลักษณะนี้จะช่วยดูดซับพลังงานที่มาจากกระแทกได้ดีขึ้น

L. M. Arzondo และคณะ [28] ศึกษาความแข็งแรงของการเชื่อมติด (Adhesion strength) ระหว่าง PP/EOC และ PP/LDPE โดยใช้วิธีทดสอบการหลุดลอก (Peeling test) ของชิ้นงานที่มีม 180 องศา พบว่าแรงที่ใช้ในการลอกชิ้นงานออกจากกันของ PP/LDPE น้อยกว่า PP/EOC เนื่องจากความเข้ากันได้ (Compatibility) ของ EOC กับ PP มีอันตรกิริยาที่มากกว่า LDPE กับ PP

R. Cao. และคณะ [29] ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการซึมผ่านของ BIIR หลังถูกปรับปรุงด้วยกระบวนการโบรมิเนชัน (Bromination) พบว่า BIIR ที่มีปริมาณโบรมีนอะตอมสูงขึ้น จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแก๊ส (Gas permeability coefficient) ที่ต่ำลง ซึ่งแสดงว่าวัสดุสามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดี โดย BIIR ที่มีปริมาณโบรมีนอยู่ 1.58 wt% จะมีค่าการซึมผ่านแก๊สที่ต่ำกว่ายาง IIR ที่ไม่มีโบรมีนอยู่ถึง 23.8%

N. Rattanasom และคณะ [30] ศึกษาความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านแก๊สของ NR/BIIR blends พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ BIIR มากกว่า 40 wt% ค่าการซึมผ่านแก๊สมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งสัมพันธ์กับสัณฐานวิทยาที่ได้คือ เฟสยาง BIIR มีลักษณะเป็นเฟสอนุภาคที่ยืดขยายขึ้น (Elongated particles) ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้จะเพิ่มระยะทางในการเคลื่อนที่ของแก๊สที่จะผ่านบริเวณเฟสของ BIIR ทำให้ต้องใช้เวลาในการซึมผ่านนานขึ้น

### บทที่ 3

#### วิธีการทดลอง

#### 3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

งานวิจัยนี้ใช้ยางโบรโมบิวทิล (เกรด 2030) พอลิโพรพิลีนแบบสุ่ม (เกรด RP348N) และเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (เกรด 8613L) นำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการทำวิจัย และมีสารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่ใช้เป็นส่วนประกอบ เช่น สารเชื่อมขวางไดคิวมิลเพอร์ออกไซด์ และสารโคเอเจนต์ไตรเมทิล-ออลโพรเพนไตรเมทาอะคริเลท รวมถึงสารเคมีที่ใช้สำหรับการทดสอบต่าง ๆ ได้แก่ สีเมทิลีนบลู และน้ำกลั่นบริสุทธิ์ไร้ไอออน เป็นต้น ตามรายชื่อบริษัทผู้ผลิตหรือจำหน่าย ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสารเคมี	เกรดสารเคมี	ชื่อทางการค้า	บริษัทผู้ผลิต/ จำหน่าย
ยางโบรโมบิวทิล (Bromobutyl rubber, BIIR)	Commercial	BIIR 2030	Arlanxeo
พอลิโพรพิลีนแบบสุ่ม (Random copolymer polypropylene, PP)	Commercial	Moplen RP348N	HMC Polymers
เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (Ethylene octene copolymer, EOC)	Commercial	Solumer™ 8613L	SK innovation
ไดคิวมิลเพอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP)	Commercial	DCP 98%	Thai Rubb Tech
ไตรเมทิลออลโพรเพน ไตรเมทาอะคริเลท (Trimethylolpropane trimethacrylate, TMPTMA)	Commercial	SR 350 NS	Thai Rubb Tech
เมทิลีนบลู (Methylene blue 95%)	Analytical	-	Loba Chemie
น้ำกลั่นบริสุทธิ์ไร้ไอออน (Deionized water)	Analytical	-	RCI Labscan



### 3.1.1 ยางโบรโมบิวทิล

ยางโบรโมบิวทิลที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเกรด BB 2030 ผลิตโดยบริษัท Arlanxco ประเทศเบลเยียม ซึ่งเป็นเกรดที่ใช้สำหรับผลิตชิ้นส่วนยางทางเภสัชกรรมและเครื่องมือแพทย์ โดยเฉพาะ เช่น จุกปิดขวดยาฉีด จุกปิดขวดไวแอล จุกปิดหลอดเก็บเลือด และชิ้นส่วนยางในหลอดฉีดยา เป็นต้น และเป็นเกรดที่มีความหนืดต่ำ ซึ่งจะช่วยให้การผสมง่ายขึ้น โดยสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลอื่น ๆ ของ BB 2030 แสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3

**ตารางที่ 3.2** สมบัติทางกายภาพของยางโบรโมบิวทิลเกรด BB 2030 [31]

สมบัติทางกายภาพ	ค่าพารามิเตอร์ (หน่วย)
ความหนาแน่น (Density)	0.93 g/cm <sup>3</sup>
ปริมาณโบรมีน (Bromine content)	1.8 wt%
ปริมาณสารรักษาความเสถียร (Stabilizer content)	1.3 wt%
ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)	32 MU
ML 1+8, 125°C มาตรฐาน ISO 289	

**ตารางที่ 3.3** สมบัติเชิงกลของยางโบรโมบิวทิลเกรด BB 2030 [31]

สมบัติเชิงกล	ค่าพารามิเตอร์ (หน่วย)
ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)	8.2 MPa
ระยะการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	660 %
มอดุลัสที่ระยะยืด 100% (100% Modulus)	1.7 MPa
มอดุลัสที่ระยะยืด 300% (300% Modulus)	2.7 MPa
ความสามารถในการคืนตัวหลังถูกที่ 70 °C, 24 hrs (Compression Set)	25%
ความแข็ง (Hardness)	50 Shore A

### 3.1.2 พอลิโพรพิลีนแบบสุ่ม

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โคพอลิเมอร์พอลิโพรพิลีนแบบสุ่มมาใช้เป็นเฟสของเทอร์มอพลาสติก เนื่องจากมีความยืดหยุ่นและความแข็งต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนแบบโฮโมพอลิเมอร์ โดยเกรดที่ใช้ คือ Moplen RP348N ผลิตโดยบริษัท HMC Polymers ประเทศไทย ซึ่งสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของ PP เกรดนี้แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติทางกายภาพและทางกลของ PP เกรด Moplen RP348N [32]

สมบัติทางกายภาพและทางกล	ค่าพารามิเตอร์ (หน่วย)	มาตรฐานที่ทดสอบ
ค่าดัชนีการไหล (Melt flow rate) (230°C / 2.16 kg)	11 dg/min	D1238
ความหนาแน่น (Density)	0.90 g/cm <sup>3</sup>	D792B
ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)	29 MPa	D638
ระยะการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	13 %	D638
มอดุลัสแรงดัดโค้ง (Flexural modulus)	1050 MPa	D790A
ความทนต่อแรงกระแทกแบบ Notched Izod impact strength ที่ 23 °C	70 J/m	D256A
อุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (Deflection temperature) ที่ 455 kPa	86 °C	D648

### 3.1.3 เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์

เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเกรด 8613L ผลิตโดยบริษัท SK innovation ประเทศเกาหลีใต้ ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพและทางกล แสดงดังตารางที่ 2.5 โดยมีความแข็งอยู่ที่ 63 Shore A ซึ่งเหมาะที่จะนำมาผสมกับ PP ที่มีค่าความแข็งสูงกว่า เพื่อลดความแข็งของวัสดุลง นอกจากนี้ยังมีค่าดัชนีการไหลอยู่ที่ 13 dg/min จึงช่วยให้เกิดการไหลระหว่างหลอมผสมได้ดี

ตารางที่ 3.5 สมบัติทางกายภาพและทางกลของ EOC เกรด 8613L [33]

สมบัติทางกายภาพและทางกล	ค่าพารามิเตอร์ (หน่วย)	มาตรฐานที่ ทดสอบ
ค่าดัชนีการไหล (Melt flow rate) (190 °C / 2.16 kg)	13 dg/min	D1238
ความหนาแน่น (Density)	0.863 g/cm <sup>3</sup>	D792
ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ML 1+4, 121 °C	3 MU	D1646
ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)	2.3 MPa	D638
ระยะการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	>1000 %	D638
มอดูลัสแรงดัดโค้ง (Flexural modulus)	7.5 MPa	D790
ความต้านทานต่อแรงฉีกขาด (Tear strength)	2.5 MPa	D624
ความแข็ง (Hardness)	63 Shore A	D2240
T <sub>m</sub>	42 °C	SK Method
T <sub>g</sub>	-57 °C	SK Method

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบการทำวิจัยตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ตลอดจนการทดสอบสมบัติต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบการวิจัย

อุปกรณ์/เครื่องมือ	รุ่น	บริษัทผู้ผลิต/จำหน่าย
เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (Balance)	ML303	Mettler Toledo, Germany
เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)	MX500-D75L90	Chareon Tut, Thailand
เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)	LRM-110	Labtech Engineering, Thailand
เครื่องอัดยางและพลาสติก (Compression molding machine)	LP-S-50	Labtech Engineering, Thailand
เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness durometer)	GS-610	Teclock, Japan
เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine)	LD5	LLOYD Instruments, England
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)	JSM-6480LV	Jeol, USA
เครื่องทดสอบรอยรั่วสุญญากาศ (Vacuum leak tester)	-	S.P.C. Engineering & Service, Thailand
เครื่องวัดสี (Portable Colorimeter)	NR110	Shenzhen ThreeNH Technology, China
เครื่องวัดชิ้นงานชนิดแสงเงา (Profile Projector)	KIM-3020CU	ARCS, Taiwan
เครื่องทดสอบอัตราการซึมผ่านแก๊ส (Gas permeability tester)	VAC-V2	Labthink, USA

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม BIIR:PP:EOC

เตรียมพอลิเมอร์ผสม BIIR:PP:EOC ดังสูตรในตารางที่ 3.7 เริ่มจากหลอมเม็ดพลาสติกในเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 170 °C ด้วยความเร็วรอบ 10 rpm เป็นระยะเวลา 5 นาที จนเม็ดพลาสติกหลอม จากนั้นเติมยาง BIIR ที่ผ่านการบดบนเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 2 นาที มาผสมกับพลาสติกที่หลอมอย่างต่อเนื่อง โดยเพิ่มความเร็วรอบเป็น 60 rpm เป็นเวลา 7 นาที จากนั้นนำไปขึ้นรูปที่เครื่องขึ้นรูปแบบอัดเข้าที่อุณหภูมิ 160°C

การตั้งชื่อตัวอย่างสูตร (Sample code) จะแทนชนิดของวัตถุดิบด้วยตัวอักษรตัวแรกในชื่อภาษาอังกฤษ อย่างเช่น Bromobutyl rubber จะแทนด้วยตัวอักษร B ส่วน Polypropylene จะแทนด้วยตัวอักษร P และ Ethylene-octene copolymer จะแทนด้วยตัวอักษร E และตามด้วยสัดส่วนการผสมของแต่ละวัตถุดิบที่ใช้

**ตารางที่ 3.7** สูตรการผสมยางโบรโมบิวทิล (BIIR) พอลิโพรพิลีน (PP) และเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (EOC) ในหน่วย parts by weight percentage (wt%)

Composition	Sample codes (wt%)					
	B65P35	B65P30E5	B65P25E10	B65P20E15	B65P10E25	B65E35
BIIR <sup>1</sup>	65	65	65	65	65	65
RPP <sup>2</sup>	35	30	25	20	10	0
EOC <sup>3</sup>	0	5	10	15	25	35

<sup>1</sup> Bromobutyl rubber, <sup>2</sup> Random polypropylene, <sup>3</sup> Ethylene-octene copolymer

#### 3.3.2 การเตรียม B65P10E25 TPV

สำหรับการเตรียม TPV จะเลือกสูตรผสม B65P10E25 มาเตรียมเป็น TPV เนื่องจากมีค่าความแข็งอยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ 40-50 Shore A โดยผสมยางกับพลาสติกในเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 170°C ความเร็วรอบ 60 rpm และนำไปรีดเพื่อลดอุณหภูมิบนเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง จากนั้นจึงนำไปผสมสารเชื่อมขวาง DCP และสารโคเอเจนต์ TMPTMA ในเครื่องผสมแบบปิดอีกครั้ง โดยอุณหภูมิการผสมเท่ากับ 80°C ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นระยะเวลา 3 นาที ดังสูตรในตารางที่ 3.8 จากนั้นนำไปขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัดเข้าที่อุณหภูมิ 160°C

ตารางที่ 3.8 สูตรการผสมยาง BIIR, PP และ EOC ในหน่วย Parts by weight percentage (wt%)

Ingredients	Sample code (wt%)
	B65P10E25 TPV
BIIR <sup>a</sup>	65
PP <sup>b</sup>	10
EOC <sup>c</sup>	25
DCP <sup>d</sup>	1.5
TMPTMA <sup>e</sup> (Co-agent)	1.0

<sup>a</sup> Bromobutyl rubber, <sup>b</sup> Polypropylene random copolymer, <sup>c</sup> Ethylene-octene copolymer

<sup>d</sup> Dicumyl peroxide, <sup>e</sup> Trimethylolpropane trimethacrylate

### 3.3.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

เตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน JIS K 6253 Type A ให้มีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร โดยพื้นผิวตัวอย่างต้องเรียบและขนานกับพื้นผิวที่สัมผัสกับเข็มที่กดลงบนชิ้นทดสอบ นำชิ้นตัวอย่างทดสอบมาทดสอบความแข็งบนเครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) แบบ Shore A รุ่น Tecklock GS-610 (รูปที่ 3.1) โดยเปลี่ยนตำแหน่งจำนวน 5 จุด ๆ ละ 1 วินาที บันทึกผลการทดสอบและหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง

### 3.3.4 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength test)

การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงตามมาตรฐาน JIS K 6301 Type 2 จะเตรียมชิ้นงานทดสอบรูปทรงแบบดัมเบล (Dumbbell) ความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2 จำนวน 5 ชิ้น ทดสอบ จากนั้นทำการวัดความหนาของชิ้นงานทดสอบ 3 ตำแหน่งด้วยกัน คือ บริเวณกึ่งกลางของระยะเริ่มต้นก่อนทดสอบ (Gauge range) และบริเวณขอบทั้งสองข้างของระยะเริ่มต้นก่อนทดสอบ โดยนำค่ากลาง (Median) มาใช้ในการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ และทดสอบโดยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal tensile tester) ดังรูปที่ 3.3 โดยใช้ความเร็วในการดึงคงที่ 500 mm/min บันทึกผลการทดสอบและหาค่าเฉลี่ย โดยค่าที่สนใจได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด (Tensile strength, TS) ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break,  $E_B$ ) และมอดุลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด} \quad TS = \frac{F_M}{A} \quad (3.1)$$

$$\text{ระยะยืด ณ จุดขาด} \quad E = \frac{L_M - L_0}{L_0} \quad (3.2)$$

$$\text{มอดุลัส} \quad M = \frac{F/A}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อ  $TS$  คือ ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด (MPa)

$E_B$  คือ ระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด

$M$  คือ มอดุลัสที่ระยะยืดที่กำหนด (MPa)

$F_M$  คือ แรงดึงสูงสุด (N)

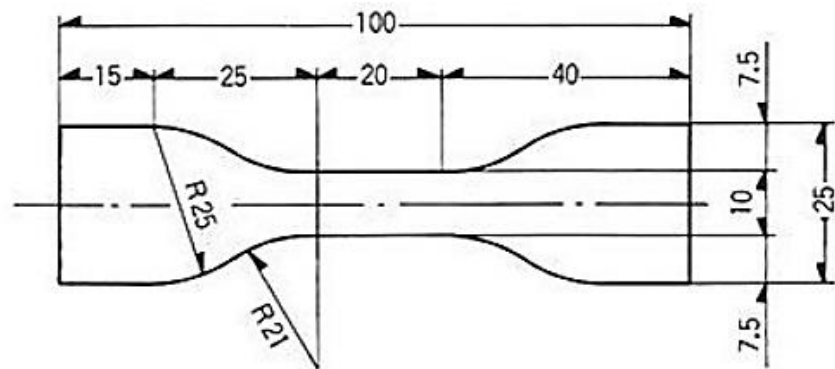
$F$  คือ แรงดึงที่ทำให้ยืดออกในระยะที่กำหนด (MPa)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนการทดสอบ ( $\text{mm}^2$ )

$L_M$  คือ ความยาว ณ จุดขาด (mm)

$L_0$  คือ ความยาวก่อนการทดสอบ (mm)

$\varepsilon$  คือ ความเครียด



รูปที่ 3.2 ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน JIS K 6301 Type 2 [34]



รูปที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

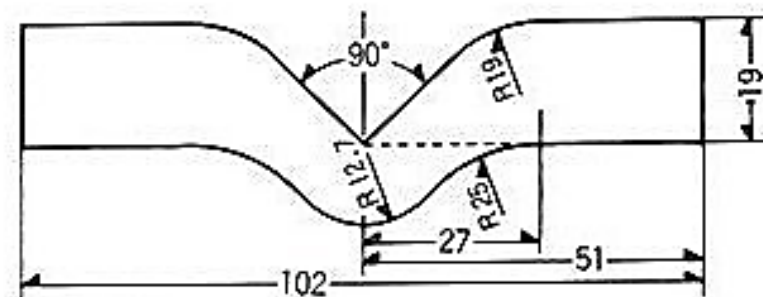


### 3.3.5 การทดสอบความต้านทานต่อแรงฉีกขาด (Tear strength test)

ความต้านทานต่อการฉีกขาดจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 624 (Die C) โดยการนำแผ่นตัวอย่างหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร มาตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นทดสอบที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.4 และวัดความหนาของชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่ง แล้วใช้ค่ากลาง (Median) เป็นค่าความหนาของชิ้นทดสอบ เพื่อใช้คำนวณค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปตั้งบนเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้ความเร็วในการดึง 500 mm/min ผลการทดสอบจะอยู่ในรูปของค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด มีหน่วยเป็น N/mm โดยคำนวณได้ตามสมการที่ (3.4)

$$T_s = \frac{F}{t} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $T_s$  คือ ความต้านทานต่อการฉีกขาด (N/mm)  
 $F$  คือ แรงที่ทำให้ชิ้นงานขาด (N)  
 $t$  คือ ความหนาของชิ้นงาน (mm)



รูปที่ 3.4 ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 624 (Die C) [34]

### 3.3.6 การทดสอบการคืนตัวกลับหลังถูกกด (Compression set test)

ความสามารถในการคืนตัวกลับหลังถูกกดจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D395 Method B โดยตัดชิ้นงานทดสอบที่มีความหนา 6 มิลลิเมตร ให้ได้ขนาดความกว้าง 30 มิลลิเมตร และความยาว 30 มิลลิเมตร จากนั้นวัดความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบก่อนนำไปวางระหว่างแท่งคั่น (Spacer bar) ที่มีขนาด 4.5 มิลลิเมตร (ซึ่งเท่ากับระยะที่ทำให้ชิ้นงานถูกกดลงมา 25% ของ

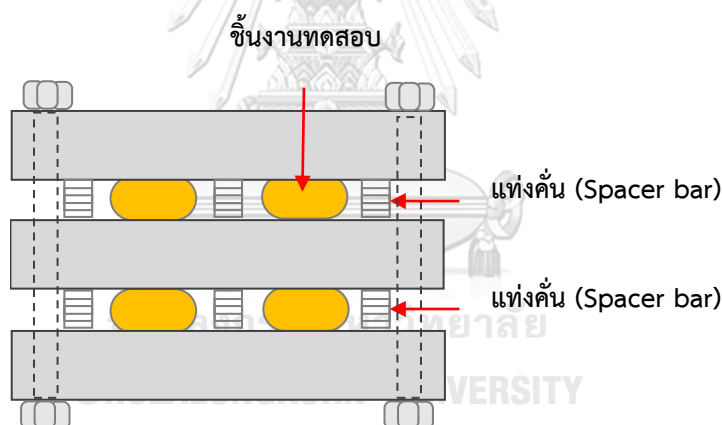
ความหนาเดิม ดังรูปที่ 3.5 และนำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาจะนำชิ้นงานออกจากแท่งคั่น แล้วนำมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 30 นาที จากนั้นวัดความหนาของชิ้นทดสอบ เพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การยุบตัวของชิ้นงานทดสอบ ดังสมการที่ (3.6)

$$\text{Compression set (\%)} = \frac{t_0 - t_f}{t_0 - t_n} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ  $t_0$  คือ ความหนาของชิ้นงานก่อนทดสอบ (mm)

$t_f$  คือ ความหนาของชิ้นงานหลังทดสอบ (mm)

$t_n$  คือ ความหนาของแท่งคั่น (mm) เพื่อตั้งระยะให้ชิ้นทดสอบยุบตัวลงไป 25% ของความหนาเดิม



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์สำหรับทดสอบ Compression set

### 3.3.7 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ และ TPV ที่เตรียมได้ จะนำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบแรงฉีกขาดมาทำการตรวจวิเคราะห์บริเวณรอยขาดของชิ้นงาน และเคลือบผิวด้วยทองคำเพื่อป้องกันการเกิดการชาร์จของประจุที่ผิวชิ้นงาน จากนั้นนำไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6480LV ดังรูปที่ 3.6 ที่กำลังขยาย (Magnification) 1000 เท่า และความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6480LV [35]

### 3.3.8 การทดสอบสมบัติหลังการหลอมขึ้นรูปซ้ำ (Reprocessing)

การทดสอบสมบัติหลังการหลอมขึ้นรูปซ้ำของ B65P10E25 TPV จะนำเศษที่เหลือจากการตัดชิ้นงานทดสอบมาผ่านกระบวนการบดรีดบนเครื่องผสมสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 2 นาที ก่อนนำเข้าเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 120 °C ด้วยความเร็วโรเตอร์ 30 rpm เป็นเวลา 3 นาที แล้วนำไปอัดชิ้นงานทดสอบที่เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดที่อุณหภูมิ 160 °C ซึ่งในการทดลองนี้จะศึกษาสมบัติทางกายภาพโดยวัดค่าสีของชิ้นงานตัวอย่างในระบบ CIE L\*a\*b\* ด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter) รุ่น NR110 ยี่ห้อ 3nh ดังรูปที่ 3.7 และใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมมองในการวัด 10° โดยที่ L\* หมายถึง ค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 (ดำ) จนถึง 100 (ขาว) ส่วน +a\* หมายถึง ค่าความเป็นสีแดง และ -a\* หมายถึง ค่าความเป็นสีเขียว +b\* หมายถึง ค่าความเป็นสีเหลือง และ -b\* หมายถึง ค่าความเป็นสีน้ำเงิน และนำไปคำนวณหาดัชนีความเหลือง (Yellowness index, YI) และดัชนีความขาว (Whiteness index, WI) ดังสมการที่ (3.7) และ (3.8) ตามลำดับ นอกจากนี้จะศึกษาสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานต่อแรงดึงของ TPV หลังถูกนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปซ้ำหลายครั้ง

$$YI = \frac{C_x X - C_z Z}{Y} \quad (3.7)$$

- เมื่อ  $YI$  คือ Yellowness index  
 $C_x$  คือ  $C_x$  coefficient (D65/10°) มีค่าเท่ากับ 1.3013  
 $C_z$  คือ  $C_z$  coefficient (D65/10°) มีค่าเท่ากับ 1.1498  
 $X, Y, Z$  คือ ค่าสีในระบบ CIE Tristimulus Value

$$WI = L^* - 3b^* + 3a^* \quad (3.8)$$

- เมื่อ  $WI$  คือ Whiteness index  
 $L^*$  คือ ค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 (ดำ) จนถึง 100 (ขาว)  
 $a^*$  คือ ค่าความเป็นสีแดง - สีเขียว  
 $b^*$  คือ ค่าความเป็นสีเหลือง - สีนํ้าเงิน

CH



รูปที่ 3.7 เครื่อง Colorimeter รุ่น NR110 ยี่ห้อ 3nh [36]

### 3.3.9 การทดสอบความสามารถในการคืนตัวกลับหลังแทงเข็ม (Self-sealing test)

จุดปิดหลอดเก็บเลือดจำเป็นต้องมีสมบัติความยืดหยุ่นและสามารถคืนตัวได้ดีหลังดึงเข็มออก (Self-sealing capacity) การทดสอบความสามารถในการคืนตัวกลับหลังแทงเข็มจะดัดแปลง

วิธีการทดสอบมาจากมาตรฐาน US Pharmacopeia <381> Elastomeric Closure for Injections (USP 381) แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยจะนำแผ่นตัวอย่างหนา 2 mm มาตัดเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm และประกอบในหลอดทดสอบ จากนั้นทดสอบตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

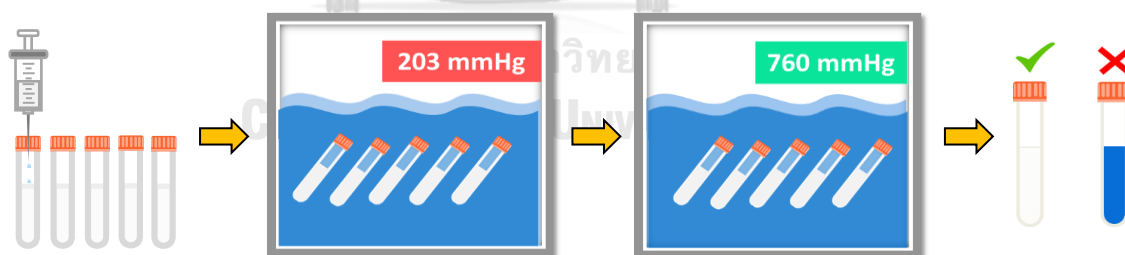
1. นำกระบอกฉีดยาและเข็มเบอร์ 20G (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 mm) ดูดน้ำกลั่นปริมาตร 6 มิลลิลิตร จากนั้นแทงเข็มผ่านชั้นตัวอย่างทดสอบและดันปลายกระบอกฉีดยาให้น้ำไหลเข้าไปในหลอดทดสอบ

2. นำหลอดทดสอบที่บรรจุน้ำกลั่นใส่ที่แทนจับตัวอย่างในเครื่องทดสอบรอยรั่วระบบสุญญากาศ (ดังรูปที่ 3.9) ที่บรรจุด้วยสารละลายสีเมทิลีนบลูความเข้มข้น 0.1% (1 g/L) จากนั้นเปิดระบบสุญญากาศไปที่แรงดัน 203 mmHg เป็นเวลา 10 นาที

3. ปิดระบบสุญญากาศ เปิดวาล์วให้อากาศภายนอกไหลเข้า เพื่อให้ความดันภายในตู้ทดสอบเท่ากับความดันบรรยากาศ (760 mmHg) แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที

4. นำหลอดทดสอบออกจากตู้ และสังเกตสีของน้ำกลั่นภายในหลอดว่าเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินหรือไม่ และบันทึกผลการทดสอบ

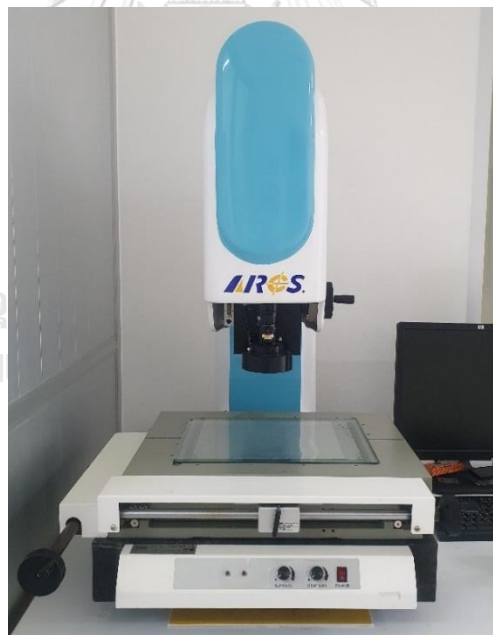
การทดลองนี้จะทำการทดสอบซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้ง และหลังการทดสอบ Self-sealing ชั้นตัวอย่างจะถูกนำไปวัดขนาดรูที่เกิดขึ้นหลังแทงเข็มบนเครื่องวัดชิ้นงานชนิดแสงเงา (Profile projector) ดังรูปที่ 3.10 เพื่อประเมินความสามารถในการซีลหลังแทงเข็ม



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดสอบความสามารถในการคืนตัวกลับหลังแทงเข็ม



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบรอยร้าวในระบบสุญญากาศสำหรับใช้ทดสอบการคืนตัวกลับหลังแทงเข็ม



รูปที่ 3.10 เครื่อง Profile projector



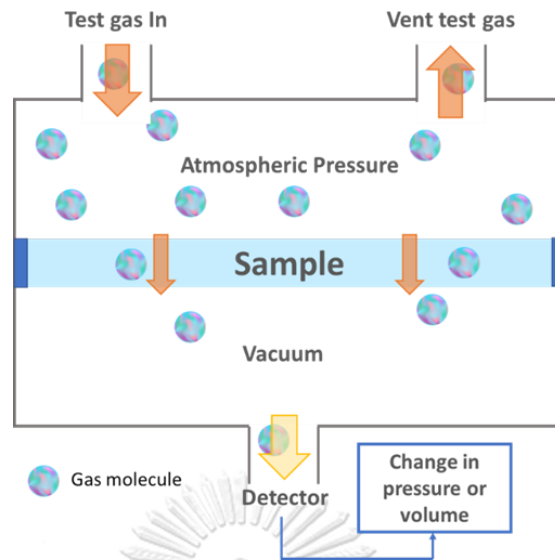
### 3.3.10 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านแก๊ส (Gas permeability test)

การประเมินความสามารถในการรักษาความเป็นสุญญากาศเมื่อนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ถูกปิดหลอดเก็บเลือด จะพิจารณาจากอัตราการซึมผ่านของแก๊ส (Gas transmission rate) แล้วนำมาประเมินอายุการใช้งานตามช่วงระยะเวลาการจัดเก็บที่กำหนดในมาตรฐาน ISO 6710 ซึ่งกำหนดความคลาดเคลื่อนของปริมาตรสุญญากาศภายในหลอดเก็บเลือดต้องไม่เกิน  $\pm 10\%$  ของปริมาตรสุญญากาศที่ถูกบรรจุในตอนเริ่มต้น การหาอัตราการซึมผ่านแก๊สนั้นจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1434 โดยเครื่องทดสอบการแพร่ผ่านของแก๊ส (Gas permeability tester) ยี่ห้อ Labthink รุ่น VAC-V2 ดังรูปที่ 3.11 ที่อุณหภูมิ  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  และใช้แก๊สทดสอบ คือ แก๊สออกซิเจน การเตรียมชิ้นงานทดสอบจะนำแผ่นตัวอย่างที่มีความหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร มาตัดเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 97 มิลลิเมตร ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 38.48 ตารางเซนติเมตร จากนั้นนำตัวอย่างมาติดตั้งบนเครื่องและทำการทดสอบ โดยจะทดสอบซ้ำ 3 ครั้งต่อตัวอย่าง



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบวัดการซึมผ่านของแก๊ส รุ่น VAC-V2 [37]

การทดสอบ GTR จะอาศัยหลักการวัดปริมาตรแก๊สที่ซึมผ่านตัวอย่างในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งกำหนดภาวะความดันในแต่ละด้านของตัวอย่างทดสอบให้แตกต่างกัน (Differential pressure method) ดังรูปที่ 3.12 โดยห้องทดสอบด้านบนที่อยู่เหนือชิ้นตัวอย่างทดสอบจะกำหนดให้เป็นภาวะความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) และเครื่องจะปล่อยแก๊สทดสอบ (Test gas) เข้าภายในห้องนี้ ส่วนห้องทดสอบด้านล่างชิ้นตัวอย่างจะกำหนดให้เป็นความดันสุญญากาศ (Vacuum pressure) เมื่อเครื่องทำงานจะบันทึกความดันที่ไปเปลี่ยนแปลงไปของห้องทดสอบด้านล่าง ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ แล้วคำนวณหาอัตราการซึมผ่านแก๊ส ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (Diffusion coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การละลาย (Solubility coefficient) ดังสมการที่ (3.9) - (3.12) ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 หลักการทดสอบ GTR แบบ Differential pressure method [38]

$$GTR = \frac{J}{At\Delta p} \quad (3.9)$$

เมื่อ  $GTR$  คือ Gas transmission rate ( $\text{cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}\cdot 0.1\text{MPa}$ )

$J$  คือ ปริมาตรของแก๊สที่ผ่านตัวอย่าง ( $\text{cm}^3$ )

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง ( $\text{m}^2$ )

$t$  คือ ระยะเวลาที่มวลของแก๊สผ่านตัวอย่าง (day)

$\Delta p$  คือ ความดันของแก๊สที่เปลี่ยนไป (Pa)

$$P = GTR \times d \quad (3.10)$$

เมื่อ  $P$  คือ Permeability coefficient ( $\text{cm}^3\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{day}\cdot 0.1\text{MPa}$ )

$GTR$  คือ Gas transmission rate ( $\text{cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}\cdot 0.1\text{MPa}$ )

$d$  คือ ความหนาของตัวอย่างทดสอบ (mm)



$$D = \frac{d^2}{6\theta} \quad (3.11)$$

- เมื่อ  $D$  คือ Diffusion coefficient (cm<sup>2</sup>/s)  
 $d$  คือ ความหนาของตัวอย่างทดสอบ (cm)  
 $\theta$  คือ ช่วงเวลา Lag time (s)

$$S = \frac{P}{D} \quad (3.12)$$

- เมื่อ  $S$  คือ Solubility coefficient (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>·Pa)  
 $P$  คือ Coefficient of permeability (cm<sup>3</sup>·cm/cm<sup>2</sup>·s·Pa)  
 $D$  คือ Diffusion coefficient (cm<sup>2</sup>/s)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

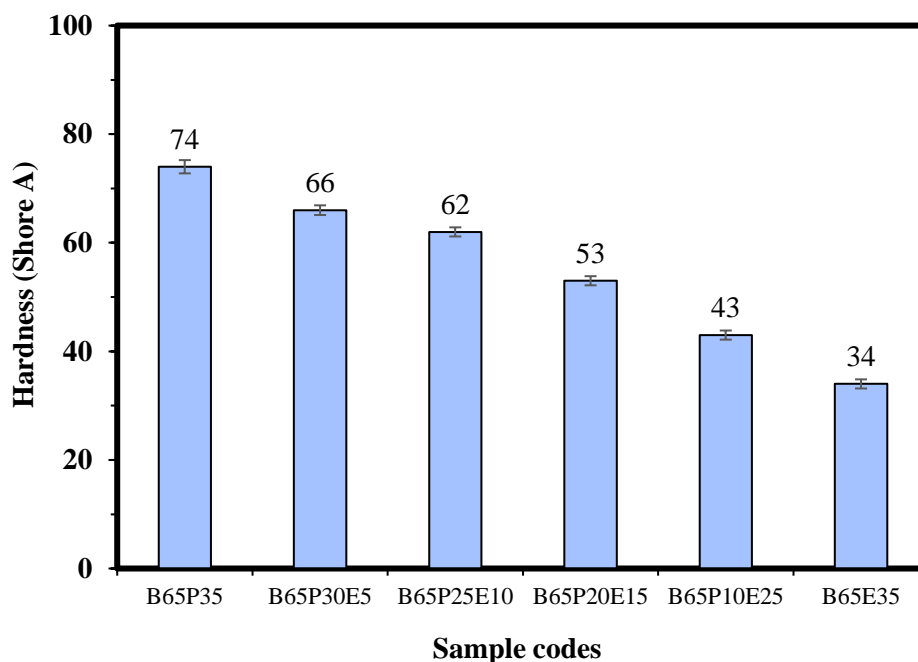
ผลการทดลองจะถูกอภิปรายตามวิธีการเตรียมออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 กล่าวถึงสมบัติของเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์ชนิดที่ไม่เติมสารวัลคาไนซ์ โดยศึกษาอัตราส่วนผสม BIIR:PP:EOC ต่าง ๆ ได้แก่ B65P35, B65P30E5, B65P25E10, B65P20E15, B65P10E25 และ B65E35 ส่วนตอนที่ 2 กล่าวถึงสมบัติของ TPV ที่เตรียมจาก B65P10E25 ซึ่งเติมสารเชื่อมขวาง DCP และสารโคเอเจนต์ TMPTMA โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยา จากนั้นตัวอย่างแต่ละสูตรจะถูกประเมินความสามารถในการคืนตัวหลังแทงเข็ม และอัตราการซึมผ่านแก๊สเพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาเลือกใช้เป็นจุกปิดหลอดเก็บเลือด

#### 4.1 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ BIIR:PP:EOC

##### 4.1.1 สมบัติเชิงกล

##### 4.1.1.1 สมบัติความแข็ง

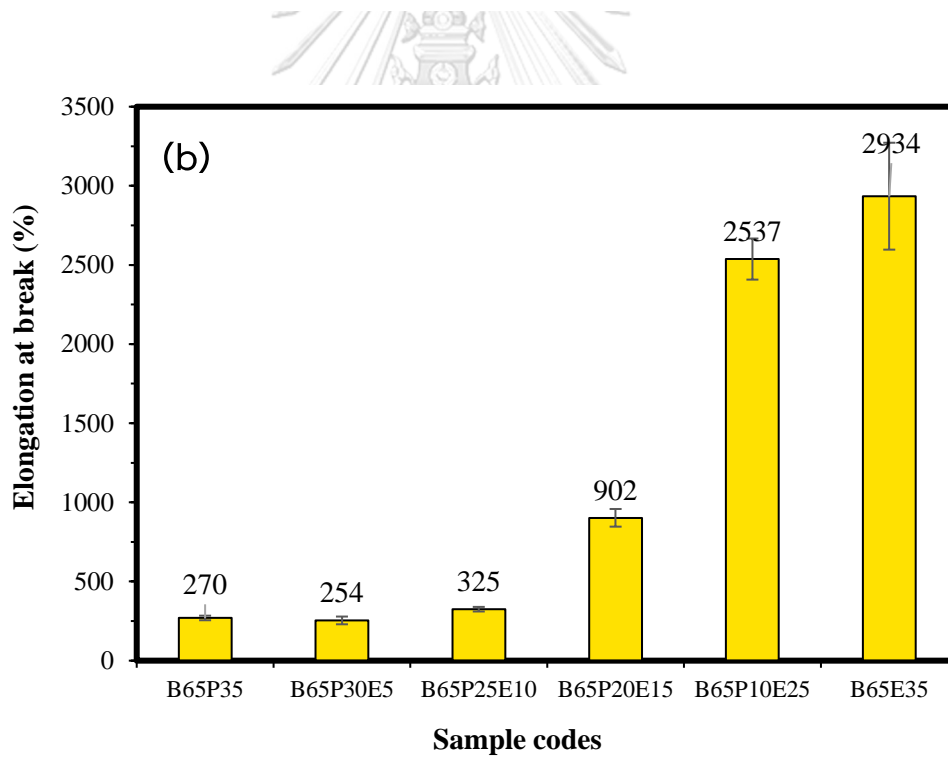
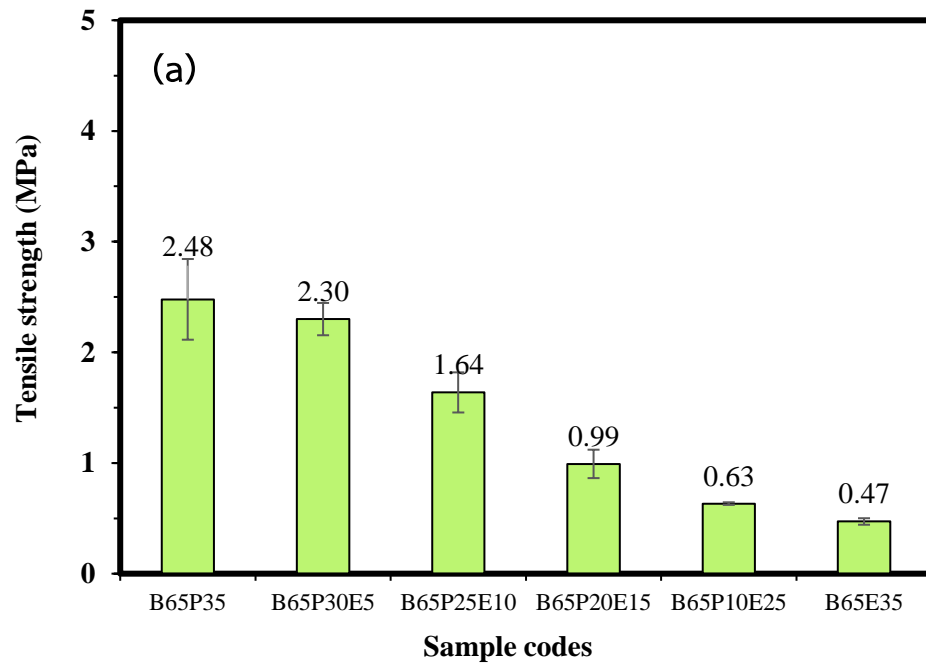
รูปที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ โดยคงสัดส่วนของ BIIR ที่ 65 wt% และแปรสัดส่วนของ PP:EOC เป็น 35:0, 30:5, 25:10, 20:15, 10:25 และ 0:35 พบว่าค่าความแข็งของ B65P35 มีค่าเป็น 74 Shore A ในขณะที่ค่าความแข็งของ B65E35 อยู่ที่ 34 Shore A ซึ่งค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณสัดส่วน EOC เพิ่มขึ้น เนื่องจาก EOC มีโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานอยู่มากกว่า PP ทำให้สามารถแสดงสมบัติความอ่อนนิ่ม (Softness) ที่อุณหภูมิห้องได้ ดังนั้นเมื่อเติม EOC เข้าไปผสมในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าความแข็งของวัสดุลดลง โดยค่าความแข็งของ BIIR:PP:EOC ที่เตรียมได้จะอยู่ในช่วง 34-74 Shore A นอกจากนี้ที่อัตราส่วนผสม BIIR:PP:EOC เป็น 65:10:25 ยังให้ความแข็งอยู่ที่ 43 Shore A ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของค่าความแข็งของจุกปิดหลอดเก็บเลือด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้อัตราส่วนนี้ในการเตรียมเป็น TPV เพื่อเพิ่มสมบัติด้านความเป็นอิลาสติกให้สามารถคงรูปร่างได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.1 ความแข็งของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

#### 4.1.1.2 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

รูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด ระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของพอลิเมอร์เบลนด์ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด และค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสัดส่วนของ EOC เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากชนิดของ EOC ที่ใช้เป็นเกรดที่มีสมบัติความทนต่อแรงดึงที่ค่อนข้างต่ำ มีค่าดัชนีการไหล (Melt flow index, MFI) เท่ากับ 13 g/10 min (ทดสอบที่อุณหภูมิ 190°C ด้วยตุ้มน้ำหนัก 2.16 kg) จึงสามารถไหลได้ดี อีกทั้งโครงสร้างส่วนอสัณฐานของ EOC สามารถทำให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ จึงเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับวัสดุ ดังเห็นได้จากค่า Elongation at break ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณ EOC ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ PP สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ แต่ก็แสดงความยืดหยุ่นต่ำกว่า EOC โดยเกรดที่ใช้มีค่า MFI อยู่ที่ 1.1 g/10 min (ทดสอบที่อุณหภูมิ 230°C ด้วยตุ้มน้ำหนัก 2.16 kg) ดังนั้นเมื่อผสม PP ในสัดส่วนที่มากขึ้น จึงทำให้วัสดุมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น



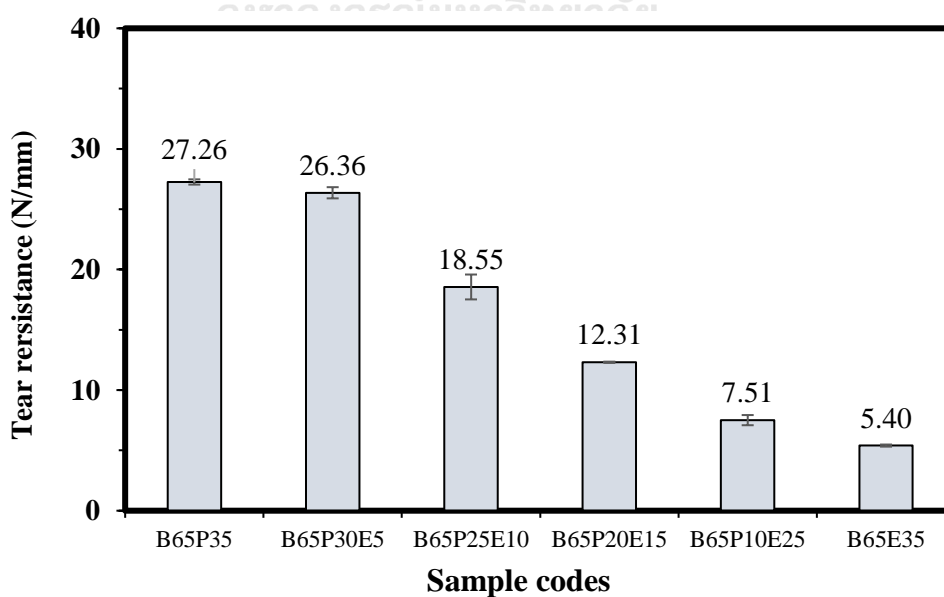
รูปที่ 4.2 (a) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และ (b) ระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาดของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

ตารางที่ 4.1 โมดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

Sample code	Modulus at 100% (MPa)	Modulus at 300% (MPa)
B65P35	2.39 ± 0.35	-
B65P30E5	2.23 ± 0.16	-
B65P25E10	1.60 ± 0.18	1.37 ± 0.15
B65P20E15	0.97 ± 0.13	0.88 ± 0.12
B65P10E25	0.59 ± 0.02	0.57 ± 0.04
B65E35	0.41 ± 0.03	0.44 ± 0.02

#### 4.1.1.3 สมบัติความต้านทานต่อแรงฉีกขาด

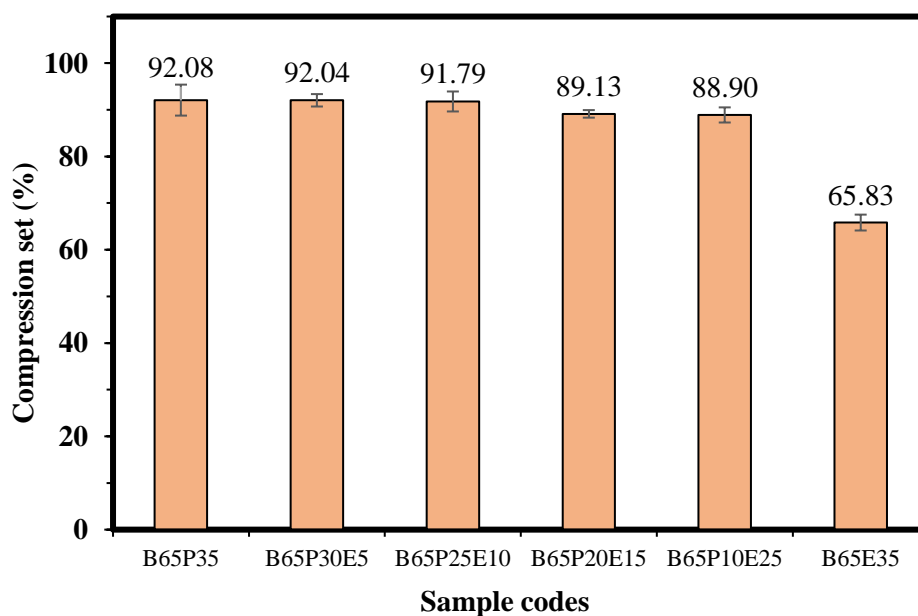
ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณ EOC ในสัดส่วนการผสมจะส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดมีค่าต่ำลง เนื่องจากทั้ง BIIR และ EOC เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง ความแข็งแรงต่ำ จึงเสียรูปหรือถูกทำลายได้ง่าย ดังนั้นเพื่อพิจารณาที่สัดส่วน PP เพิ่มขึ้น พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดสูงขึ้น ทั้งนี้ส่วนที่เป็นผลึกของ PP สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่อ่อนนิ่มได้ดี



รูปที่ 4.3 ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

#### 4.1.1.4 สมบัติการคืนตัวหลังได้รับแรงกด

การทดสอบการคืนตัวเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังปล่อยแรงที่กระทำให้ยางหรือ อีลาสโตเมอร์เสียรูปร่าง เพื่อประเมินความสามารถในการคืนตัวสู่รูปร่างเดิมของยางหรืออีลาสโตเมอร์นั้น ๆ รูปที่ 4.4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัวหลังได้รับแรงกดของ BIIR:PP:EOC พบว่าเมื่อสัดส่วนปริมาณ PP มากขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัวหลังได้รับแรงกดของตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก PP เป็นเทอร์โมพลาสติกที่ไม่มีความเป็นอีลาสติก เมื่อนำไปผสมกับยาง BIIR ที่ยังไม่วัลคาไนซ์ จึงทำให้สมบัติการคืนตัวของอีลาสติกของวัสดุลดลง ในขณะที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาณ EOC มากขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัวหลังได้รับแรงกดมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุมีความเป็นอีลาสติกเพิ่มขึ้น เนื่องจาก EOC มีโครงสร้างทางเคมีที่ประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุลยาวของออกทีน (Octene) ซึ่งจะสามารถแสดงความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิห้องได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสามารถในการคืนรูปร่างเดิมหลังถูกกดของ BIIR:PP:EOC ทั้งหมด พบว่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัวหลังได้รับแรงกดมีค่าค่อนข้างสูงในทุกอัตราส่วนการผสม เนื่องจากมีสัดส่วนของเฟสยาง BIIR ที่ยังไม่วัลคาไนซ์อยู่มากถึง 65 wt% จึงทำให้เสียรูปได้ง่ายและแสดงสมบัติการคืนรูปร่างได้ไม่ดี



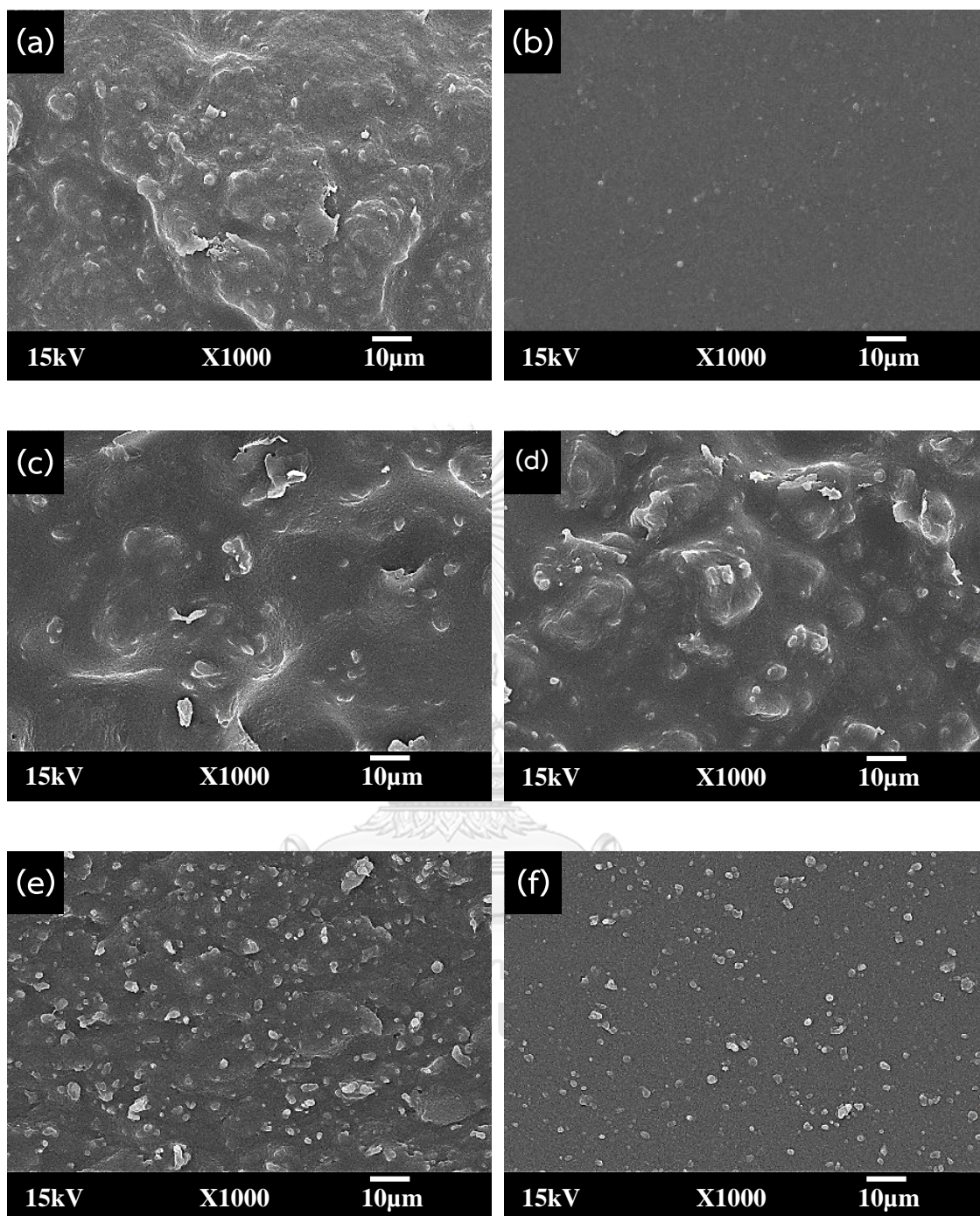
รูปที่ 4.4 เปอร์เซนต์การยุบตัวหลังได้รับแรงกดของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

#### 4.1.2 สัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของ BIIR:PP:EOC จะส่องดูพื้นผิวบริเวณรอยขาดของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากรูปที่ 4.5 แสดงภาพ SEM ของตัวอย่าง BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ จะสังเกตเห็นว่าภาพ SEM ปรากฏพื้นที่ที่มีความเข้มสีต่างกัน 3 ระดับ กล่าวคือ บริเวณพื้นที่สีขาว (White area) หรือสว่าง (Bright area) แสดงถึงเฟสของ PP ส่วนบริเวณพื้นที่สีเทาอ่อน (Soft grey area) แสดงถึงเฟสของ EOC และบริเวณพื้นที่สีเทาเข้ม (Dark grey area) แสดงถึงเฟสของ BIIR ซึ่งการระบุชนิดของเฟสดังที่กล่าวมาจะเปรียบเทียบกับภาพ SEM ที่ได้จาก Neat PP, Neat EOC และ Neat BIIR ตามลำดับ รูปที่ 4.5 (a) แสดงสัณฐานวิทยาของตัวอย่าง B65P35 พบเฟสของ PP กระจายตัวอยู่รวมในเฟสของ BIIR โดยจะสังเกตเห็นสีของแต่ละเฟสแยกชัดเจน และมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogenous morphology) นอกจากนี้พื้นผิวบริเวณรอยขาดยังมีความขรุขระ ไม่เรียบ ส่วนรูปที่ 4.5 (b) แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวอย่าง B65E35 ที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous morphology) และพื้นผิวบริเวณรอยแตกหักมีความเรียบสม่ำเสมอ ซึ่งจากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า BIIR มีความเข้ากันได้ดีกับ EOC มากกว่า PP ซึ่งความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์จะพิจารณาจากความแตกต่างระหว่างความสามารถในการละลาย ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดของ พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่นำมาผสมกัน ถ้าพอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีค่าแรงดึงดูดสูง จะทำให้เกิดเป็นระบบ 2 เฟสที่มีเฟสขนาดใหญ่ (Coarse dispersion) ซึ่งจะปลดพื้นที่ระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial area) และพลังงานระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial energy) ในขณะที่ถ้าคู่พอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการละลายใกล้เคียงกันจะทำให้เกิดการกระจายตัวที่มีขนาดเฟสเล็กกว่า [4] นอกจากนี้สัณฐานวิทยาของตัวอย่าง B65P35 และ B65E35 จะมีโครงสร้างแบบเฟสต่อเนื่องร่วม (Co-continuous phase morphology)

รูปที่ 4.5 (c) - (f) แสดงโครงสร้างสัณฐานวิทยาของ BIIR:PP:EOC แบบ Ternary-phase morphology โดยเฟสของ PP ที่มีความหนืดต่ำกว่าจะถูกล้อมรอบด้วยเฟสของ EOC ที่มีความหนืดอยู่ระหว่าง PP กับ BIIR และกระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องของ BIIR ที่มีสัดส่วนการผสมและความหนืดมากที่สุด เพื่อลดพลังงานในระบบการผสม [39] เฟสของ PP จะมีขนาดเล็กลงตามสัดส่วนปริมาณ EOC ที่มากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า EOC สามารถลดแรงดึงดูดระหว่างเฟส BIIR และ PP โดยจะสร้างสมดุลความหนืดภายในระบบการผสม ทำให้แต่ละเฟสสามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังเพิ่มพื้นที่ระหว่างผิวสัมผัสและพลังงานระหว่างผิวสัมผัสให้เกิดความเข้ากันได้พอลิเมอร์เบลนด์มากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของ EOC เป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนและออกทีน จึง





รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนผสม (a) B65P35, (b) B65E35, (c) B65P30E5, (d) B65P25E10, (e) B65P20E15 และ (f) B65P10E25



ทำหน้าที่เสมือนเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง BIIR และ PP โดยส่วนของออกทีนจะเข้ากันได้ดีกับ PP และส่วนของเอทิลีนจะเข้ากันได้กับโครงสร้างของ BIIR [40] สันฐานวิทยาที่ได้จากการทดลองนี้ยังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ R.R. Babu และคณะ [12] ที่ศึกษาสันฐานวิทยาของคู่เบลนด์ EOC/PP และ EPDM/PP พบว่าโครงสร้างสันฐานของคู่เบลนด์ PP/EOC มีเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของเฟสแบบต่อเนื่องร่วมสูงกว่าคู่เบลนด์ PP/EPDM เนื่องจาก PP/EOC มีอัตราส่วนความหนืดต่ำ และมีอันตรกิริยาระหว่างผิวสัมผัสที่ดีต่อกัน จึงสามารถผสมเข้ากันได้ดี

จากผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนการผสม BIIR, PP และ EOC ที่มีความแข็งอยู่ในช่วง 40-50 Shore A สามารถสรุปได้ว่า ที่อัตราส่วนการผสม BIIR:PP:EOC เป็น 65:10:25 มีค่าความแข็งที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปใช้เตรียมเป็น TPV โดยค่าความแข็งของสูตรนี้คือ 43 Shore A แต่เมื่อพิจารณาถึงสมบัติเชิงกลด้านอื่น ๆ เช่น ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด และความต้านทานต่อแรงฉีกขาด ยังมีค่าค่อนข้างต่ำ รวมทั้งสมบัติการคืนตัวหลังได้รับแรงกด พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การคืนตัวหลังได้รับแรงกดของสูตรนี้มีค่าประมาณ 88.90% ซึ่งเป็นค่าที่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ของจุกปิดหลอดเก็บเลือด ซึ่งกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์การคืนตัวหลังได้รับแรงกดของผลิตภัณฑ์ต้องต่ำกว่า 30% [41] ดังนั้นในตอนถัดไปผู้วิจัยจะทำการเตรียม TPV เพื่อให้เฟสยางเกิดการวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วน B65P10E25 แล้วเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลและสันฐานวิทยาของ B65P10E25 และ B65P10E25 TPV

## 4.2 การเตรียม B65P10E25 TPV

### 4.2.1 สมบัติเชิงกล

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่าง B65P10E25 และ B65P10E25 TPV พบว่าหลังเกิดวัลคาไนเซชันในเฟสยาง จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่าง ๆ โดยสมบัติความแข็งหลังเตรียมเป็น TPV มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 45 Shore A ซึ่งมากกว่า B65P10E25 ประมาณ 2 Shore A ส่วนความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดมีค่าเป็น  $45.74 \text{ kg/cm}^2$  ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็น 7 เท่าของค่า TS ของ B65P10E25 และค่าระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเป็น 803% นอกจากนี้ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของ TPV ยังเพิ่มขึ้นเป็น  $21.04 \text{ kg/cm}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุมีความแข็งแรงและความเหนียวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเกิดวัลคาไนเซชันด้วยสารเพอร์ออกไซด์ จะเกิดการเชื่อมขวาง (Crosslinking) ด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bonds) ของคาร์บอน ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้เกิดโครงสร้างแบบร่างแห (Crosslinked network structure) จึงทำ

ให้ความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้น [42] เมื่อพิจารณาสมบัติการคืนตัวหลังได้รับแรงกดของ TPV พบว่ามีค่าลดลงเป็น 21.83% ซึ่งค่าที่ได้นี้อยู่ในค่าที่กำหนดตามมาตรฐานของจุกปิดหลอดเก็บเลือดที่จะนำไปใช้ผลิตได้

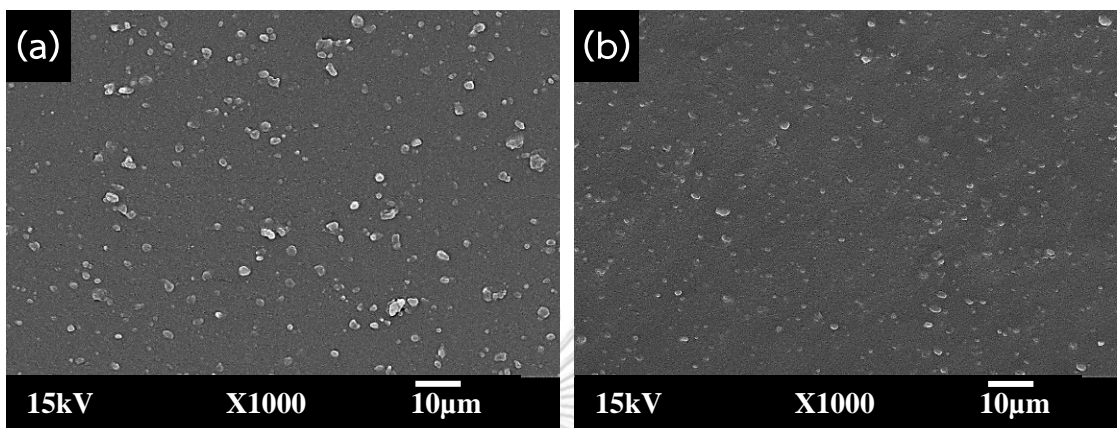
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ B65P10E25 และ B65P10E25 TPV

Mechanical properties	Unit	Sample codes	
		B65P10E25	B65P10E25 TPV
Hardness	Shore A	43 ± 0.84	45 ± 0.84
Tensile strength	MPa	0.63 ± 0.01	4.48 ± 0.44
Elongation at break	%	2537 ± 130	803 ± 61
Modulus at 100%	MPa	0.59 ± 0.02	0.96 ± 0.15
Modulus at 300%	MPa	0.57 ± 0.04	2.13 ± 0.51
Tear resistance	N/mm	7.51 ± 0.42	20.62 ± 0.68
Compression set	%	88.90 ± 1.64	21.83 ± 1.70

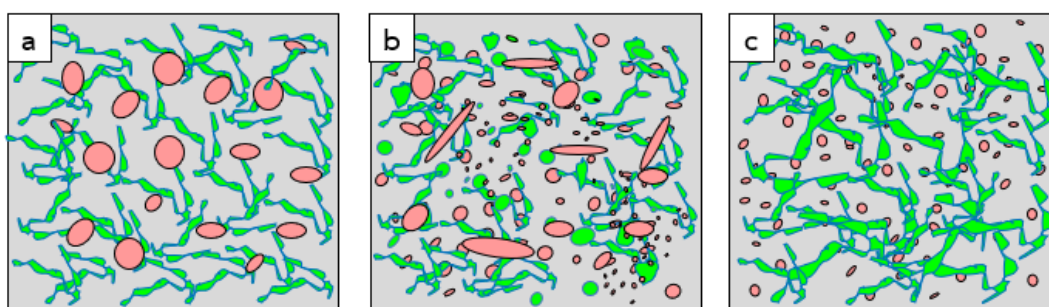
#### 4.2.2 สันฐานวิทยา

รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบโครงสร้างสันฐานวิทยาของ B65P10E25 และ B65P10E25 TPV ที่เตรียมได้ พบว่าหลังเติมสารวัลคาไนซ์จะได้สันฐานวิทยาของ B65P10E25 TPV ที่มีขนาดอนุภาคของ PP เล็กลงเมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคของ PP ใน B65P10E25 ที่ปราศจากสารวัลคาไนซ์ โดยกลไกการเปลี่ยนแปลงทางสันฐานวิทยาของ B65P10E25 TPV สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.7 โดยก่อนเกิดวัลคาไนเซชัน อนุภาคเฟสของ PP มีการกระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องของ BIIR และ EOC เนื่องจากสัดส่วนปริมาณของเฟสยางมากกว่าเฟสพลาสติก (ดังรูป 4.7a) เมื่อเกิดกระบวนการวัลคาไนเซชันที่ระดับการเชื่อมขวางต่ำ ๆ ความหนืดของเฟส BIIR และ EOC จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น โดยโมเลกุลของ BIIR และ EOC สามารถเกิดการเชื่อมขวางด้วยเพอร์ออกไซด์บนสายโซ่โมเลกุลได้ ส่งผลให้เฟสของ BIIR และ EOC ที่เป็นเฟสต่อเนื่องเริ่มแตกเฟสออกเป็นอนุภาคระดับไมโคร (Microparticles) กระจายอยู่ร่วมกับเฟสของ PP ซึ่งในระหว่างนั้นเฟสของ PP ก็มีการแตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กลงเช่นกัน เนื่องจากเมื่อในระบบมีสารเพอร์ออกไซด์อยู่ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการตัดสายโซ่โมเลกุลของ PP ลงเช่นกัน (ดังรูป 4.7b) เมื่อในระบบเริ่มมีปริมาณการเชื่อมขวางสูงขึ้น จะ

ทำให้ความหนืดในระบบสูงขึ้น ซึ่งจะเพิ่มแรงเฉือนระหว่างเมทริกซ์กับเฟสกระจาย ซึ่งเฟสกระจายจะถูกเฉือนให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงและกระจายตัวอยู่ในเฟสยางที่มีการเชื่อมขวาง (ดังรูป 4.7c)



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (a) B65P10E25 และ (b) B65P10E25 TPV



รูปที่ 4.7 แบบจำลองการพัฒนาวัสดุฐานวิทยาศาสตร์ของ B65P10E25 TPV (a) ก่อนเกิดการวัลคาไนเซชัน (b) ขณะเกิดวัลคาไนเซชัน และ (c) หลังสิ้นสุดกระบวนการวัลคาไนเซชัน (สีเขียวแทนเฟสของ EOC สีชมพูแทนเฟสของ PP และสีเทาแทนเฟสของ BIIR)

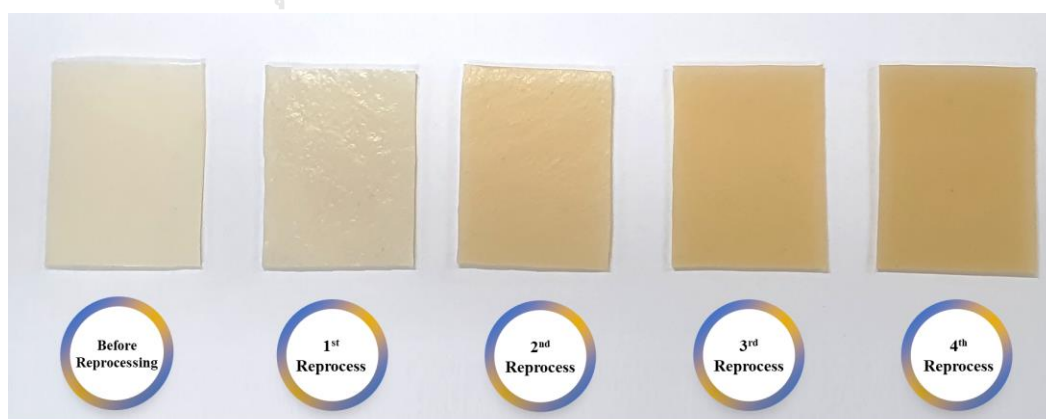
#### 4.2.3 ความสามารถในการหลอมขึ้นรูปซ้ำ

เนื่องจาก TPV มีเฟสของเทอร์โมพลาสติกเป็นส่วนประกอบ จึงทำให้สามารถนำมาผ่านกระบวนการหลอมขึ้นรูปซ้ำ (Reprocessing process) หรือกระบวนการรีไซเคิล (Recycling process) ใหม่ได้ แต่โดยธรรมชาติของพอลิเมอร์ที่เมื่อได้รับความร้อนและแรงเฉือนซ้ำ ๆ ก็เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและสมบัติเชิงกล ซึ่งในการทดลองนี้จะศึกษาค่าพารามิเตอร์สีในระบบ Commission internationale de l'éclairage (CIE) ได้แก่ ความสว่าง (Lightness,  $L^*$ ) มีค่าตั้งแต่

0 (มืด) จนถึง 100 (สว่าง) ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (Red-green opponent colors,  $a^*$ ) โดย  $+a^*$  หมายถึง ค่าความเป็นสีแดง และ  $-a^*$  หมายถึง ค่าความเป็นสีเขียว ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (Yellow-blue opponent colors,  $b^*$ ) โดย  $+b^*$  หมายถึง ค่าความเป็นสีเหลือง และ  $-b^*$  หมายถึง ค่าความเป็นสีน้ำเงิน ดัชนีความเหลือง (Yellowness, YI) และดัชนีความขาว (Whiteness, WI) ของ B65P10E25 TPV รวมถึงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดหลังถูกนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปซ้ำหลาย ๆ ครั้ง

#### 4.2.3.1 สมบัติทางกายภาพ

รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะทางกายภาพของ B65P10E25 TPV ที่ผ่านกระบวนการหลอมขึ้นรูปซ้ำตามจำนวนรอบต่าง ๆ พบว่าลักษณะผิวของ TPV หลังผ่านการขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ 2 มีผิวที่ขรุขระขึ้นเมื่อเทียบกับ TPV ที่ยังไม่ได้ผ่านการหลอมขึ้นรูปใหม่ ส่วน TPV ที่ผ่านการหลอมขึ้นรูปใหม่เป็นครั้งที่ 3 และ 4 เริ่มมีผิวที่เรียบขึ้นตามลำดับ ส่วนผลจากการสังเกตสีของ TPV ที่เปลี่ยนไปพบว่ามีสีเหลืองเข้มและคล้ำขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าสีที่วัดได้ ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 โดยพบว่าค่า YI ที่แสดงถึงระดับความเข้มของสีเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่า WI ที่แสดงถึงระดับความขาวมีค่าลดลงตามจำนวนรอบการผ่านกระบวนการขึ้นรูปซ้ำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนสีของวัสดุหลังนำมาผ่านการขึ้นรูปซ้ำหลายครั้งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนสายโซ่ของพอลิโพรพิลีนในขณะมีอนุมูลอิสระหลงเหลืออยู่ในระบบ ซึ่งจะก่อให้เกิดสารใหม่ที่มีสี เช่น สารอนุพันธ์กลุ่มคีโตน (Ketone) หรือ แอลดีไฮด์ (Aldehyde) เป็นต้น ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



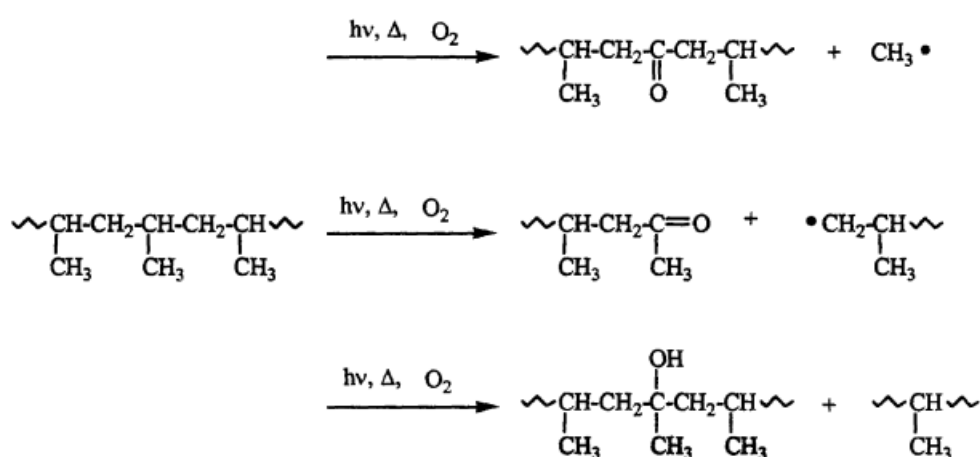
รูปที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของ B65P10E25 TPV ที่ผ่านกระบวนการหลอมขึ้นรูปซ้ำตามจำนวนรอบต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์สี L\* a\* b\* ของ B65P10E25 TPV ที่ผ่านการขึ้นรูปซ้ำในรอบต่าง ๆ

Number of reprocessing	L*	a*	b*
0	64.80 ± 0.70	0.10 ± 0.08	3.97 ± 0.09
1	61.10 ± 0.17	0.34 ± 0.01	4.88 ± 0.31
2	58.75 ± 0.54	1.85 ± 0.06	11.12 ± 0.14
3	57.94 ± 0.42	3.06 ± 0.05	14.44 ± 0.39
4	56.03 ± 0.98	3.57 ± 0.04	14.51 ± 0.35

ตารางที่ 4.4 ค่า YI และ WI ของ B65P10E25 TPV ที่ผ่านการขึ้นรูปซ้ำในรอบต่าง ๆ

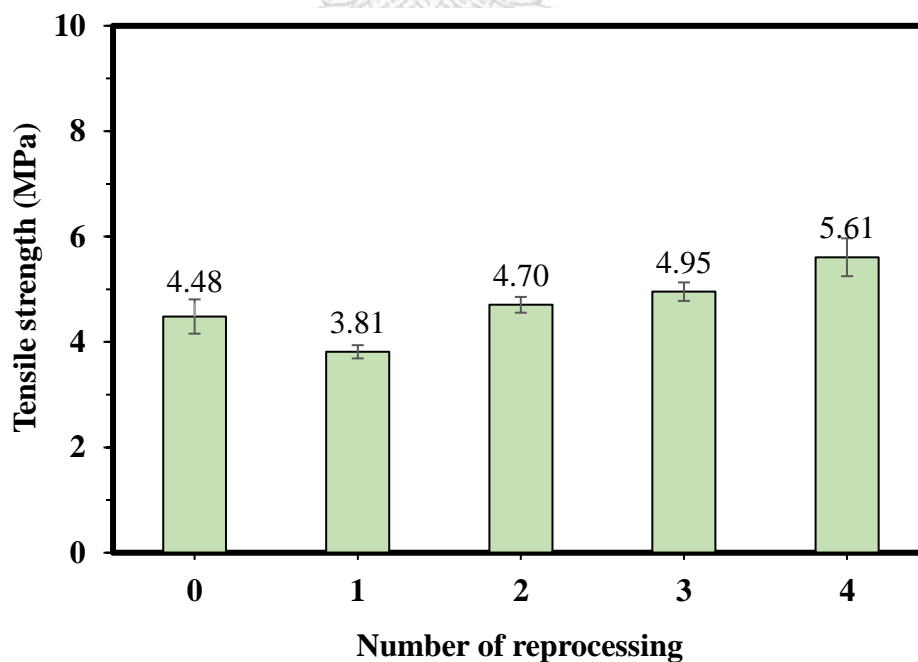
Number of reprocessing	YI	WI
0	10.29 ± 0.10	53.21 ± 0.48
1	13.49 ± 0.84	47.48 ± 0.82
2	31.36 ± 0.27	30.93 ± 0.21
3	40.82 ± 0.57	23.79 ± 0.77
4	43.07 ± 0.40	23.20 ± 0.27



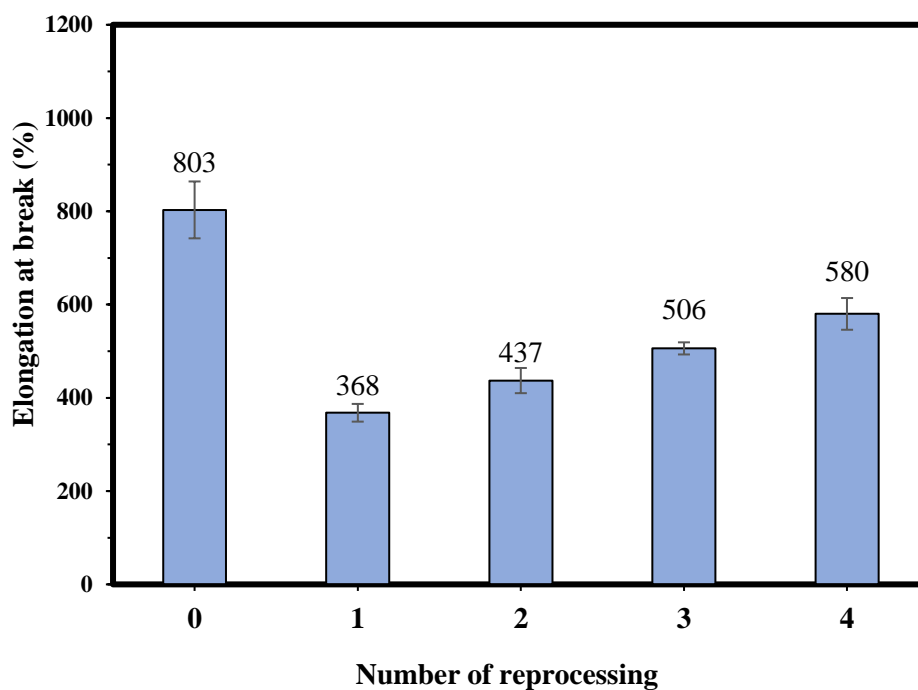
รูปที่ 4.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนสายโซ่ของพอลิโพรพิลีน [43]

#### 4.2.3.2 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด และระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาดของ B65P10E25 TPV หลังผ่านกระบวนการขึ้นรูปซ้ำที่จำนวนครั้งต่าง ๆ พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการขึ้นรูปซ้ำ 1 ครั้ง มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด และระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ของเฟส PP จากนั้นเมื่อนำไปผ่านการหลอมขึ้นรูปใหม่ตั้งแต่ครั้งที่ 2 เป็นต้นไป ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด ระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด รวมถึงค่ามอดูลัสที่ระยะการดึง 100% และ 300% (ดังตารางที่ 4.5) มีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งนี้ปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ของ PP จะลดลงหลังการนำไปหลอมขึ้นรูปใหม่ครั้งแรกแล้ว ซึ่งเมื่อนำไปหลอมขึ้นรูปครั้งถัด ๆ ไป วัสดุเมื่อได้รับความร้อนและแรงเฉือนเพิ่มขึ้น จะทำให้เฟสกระจายถูกตัดด้วยแรงดึงกล่าว ส่งผลให้เฟสกระจายมีขนาดเล็กลง และสามารถกระจายเข้ากับเฟสต่อเนื่องได้เพิ่มขึ้น จึงทำให้สมบัติเชิงกลด้านความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด และระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด มีแนวโน้มสูงขึ้น รวมทั้งการมีอยู่ของอนุภาคลิเธียยังสามารถทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างกันได้ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อนสูงและสามารถเกิดต่อไปได้เรื่อย ๆ トラบไต้ที่ในระบบยังมีอนุภาคลิเธียเหลืออยู่ ดังนั้นเมื่อถูกนำไปผ่านกระบวนการหลอมขึ้นรูปซ้ำ โมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุภาคลิเธียจะเกิดการเชื่อมพันธะระหว่างโมเลกุลกันได้อีก ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [44]



รูปที่ 4.10 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของ B65P10E25 TPV ตามจำนวนการหลอมขึ้นรูปซ้ำ



รูปที่ 4.11 ระยะเวลายืดสูงสุด ณ จุดขาดของ B65P10E25 TPV ตามจำนวนการหลอมขึ้นรูปซ้ำ

ตารางที่ 4.5 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของ B65P10E25 TPV ตามจำนวนการหลอมขึ้นรูปซ้ำ

Number of reprocessing	Modulus at 100% (MPa)	Modulus at 300% (MPa)
0	0.96 ± 0.15	1.70 ± 0.21
1	1.48 ± 0.05	3.28 ± 0.14
2	1.51 ± 0.07	3.36 ± 0.14
3	1.40 ± 0.03	3.00 ± 0.11
4	1.43 ± 0.04	2.97 ± 0.07

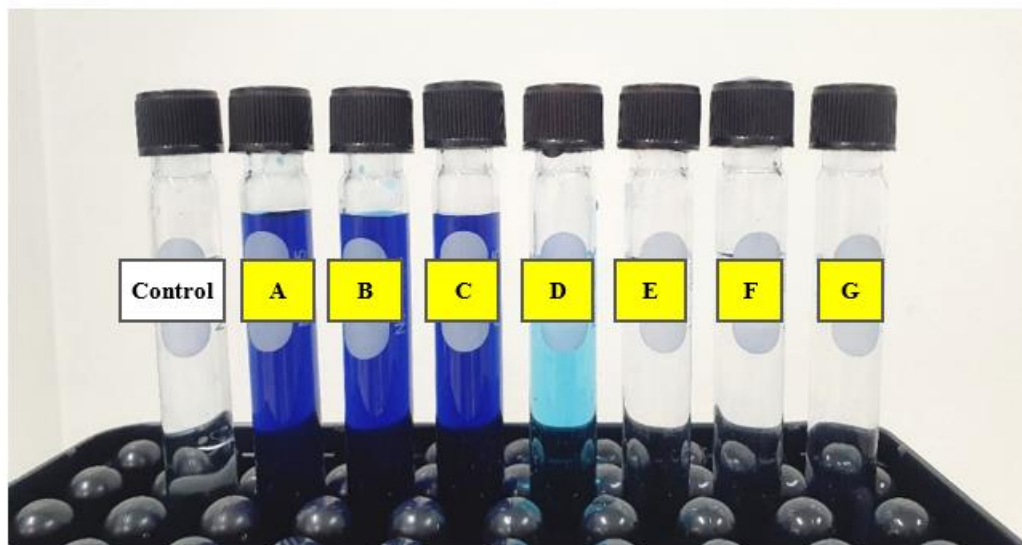
#### 4.3 ความสามารถในการคืนตัวกลับหลังแทงเข็ม

การทดสอบการคืนตัวหลังแทงเข็ม จะดัดแปลงวิธีการทดสอบมาจากมาตรฐาน USP 381 ซึ่งใช้ประเมินสมบัติการคืนตัวกลับหลังแทงเข็มของผลิตภัณฑ์จุกยางที่ใช้สำหรับฉีด (Elastomeric closure for injections) ในการทดสอบนี้จะจำลองการแทงเข็มบนชิ้นตัวอย่างที่มีความหนา 2 mm

ด้วยเข็มฉีดยาขนาด 20G (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเข็มเท่ากับ 0.9 mm) ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้สำหรับดูดเก็บเลือดเพื่อตรวจวิเคราะห์ และนำไปทดสอบในตู้ทดสอบรอยรั่วระบบสุญญากาศ (Vacuum leak tester) โดยกำหนดให้ภาวะความดันภายในตู้ทดสอบที่บรรจุสารละลายสีเป็นความดันสุญญากาศ เพื่อสร้างภาวะให้เกิดความแตกต่างระหว่างความดันภายในและภายนอกหลอดทดสอบ ขณะทำการทดสอบอากาศที่อยู่ในหลอดทดสอบจะถูกดันออกมาผ่านรูของชิ้นตัวอย่างทดสอบ จากนั้นสารละลายสีที่บรรจุอยู่ในตู้ทดสอบจะไหลผ่านรูเข้ามาแทนที่ปริมาตรอากาศที่ถูกถ่ายโอนออกไป ดังนั้นชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ไม่สามารถซีลตัวเองได้หลังจากดึงเข็มออก จะสังเกตเห็นสีของสารละลายที่รั่วเข้ามาในหลอดทดสอบ ดังรูปที่ 4.12 จากผลการทดสอบการรั่วหลังแทงเข็มดังตารางที่ 4.6 พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบนี้ ได้แก่ B65P10E25, B65E35 และ B65P10E25 TPV โดยสังเกตเห็นว่าสีของน้ำภายในหลอดทดสอบยังคงใสเหมือนกับหลอดควบคุมที่ไม่ได้แทงเข็ม ส่วนหลอดทดสอบของตัวอย่าง B65P35, B65P30E5, B65P25E10 และ B65P20E15 พบว่าสีของน้ำภายในหลอดเปลี่ยนเป็นสีฟ้าของสารละลายสีที่บรรจุอยู่ในตู้ทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นตัวอย่างมีรูรั่ว เนื่องจากตัวอย่างเหล่านี้มีสมบัติการคืนตัวหลังแทงเข็มที่ไม่ดี

รูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.7 แสดงผลการวัดขนาดรูของชิ้นตัวอย่างหลังทดสอบการรั่วหลังแทงเข็มด้วยเครื่องวัดขนาดชนิดแสงเงา (Profile projector) ที่กำลังขยาย 2x พบว่าขนาดรูที่เกิดขึ้นของตัวอย่างทั้งหมดเล็กกว่าขนาดของรูเข็มที่ใช้แทงผ่านตัวอย่าง ในหลอดตัวอย่าง A, B และ C ที่น้ำเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในแนวแกน X ตั้งแต่ 0.376 - 0.385 mm และแนวแกน Y ตั้งแต่ 0.727 - 0.857 mm ส่วนหลอดตัวอย่าง D ที่ปรากฏสีน้ำเป็นสีฟ้าอ่อน พบการรั่วเพียงเล็กน้อย จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในแนวแกน X เท่ากับ 0.182 mm และแกน Y เท่ากับ 0.682 mm ส่วนหลอดที่ไม่พบการรั่วของสีเมทิลินบลูจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในแนวแกน X ต่ำกว่า 0.118 mm และแกน Y ต่ำกว่า 0.623 mm จากผลการทดสอบความสามารถในการคืนตัวหลังแทงเข็ม สามารถสรุปได้ว่าการผสม EOC ที่มากกว่า 25% ขึ้นไป สามารถปรับปรุงสมบัติการซีลของวัสดุได้ ส่วนขนาดรูหลังแทงเข็มของ B65P10E25 และ B65P10E25 TPV ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ





รูปที่ 4.12 หลอดทดสอบของตัวอย่างสูตรต่าง ๆ หลังทดสอบการรั่วหลังแทงเข็ม

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการรั่วหลังแทงเข็มของตัวอย่าง

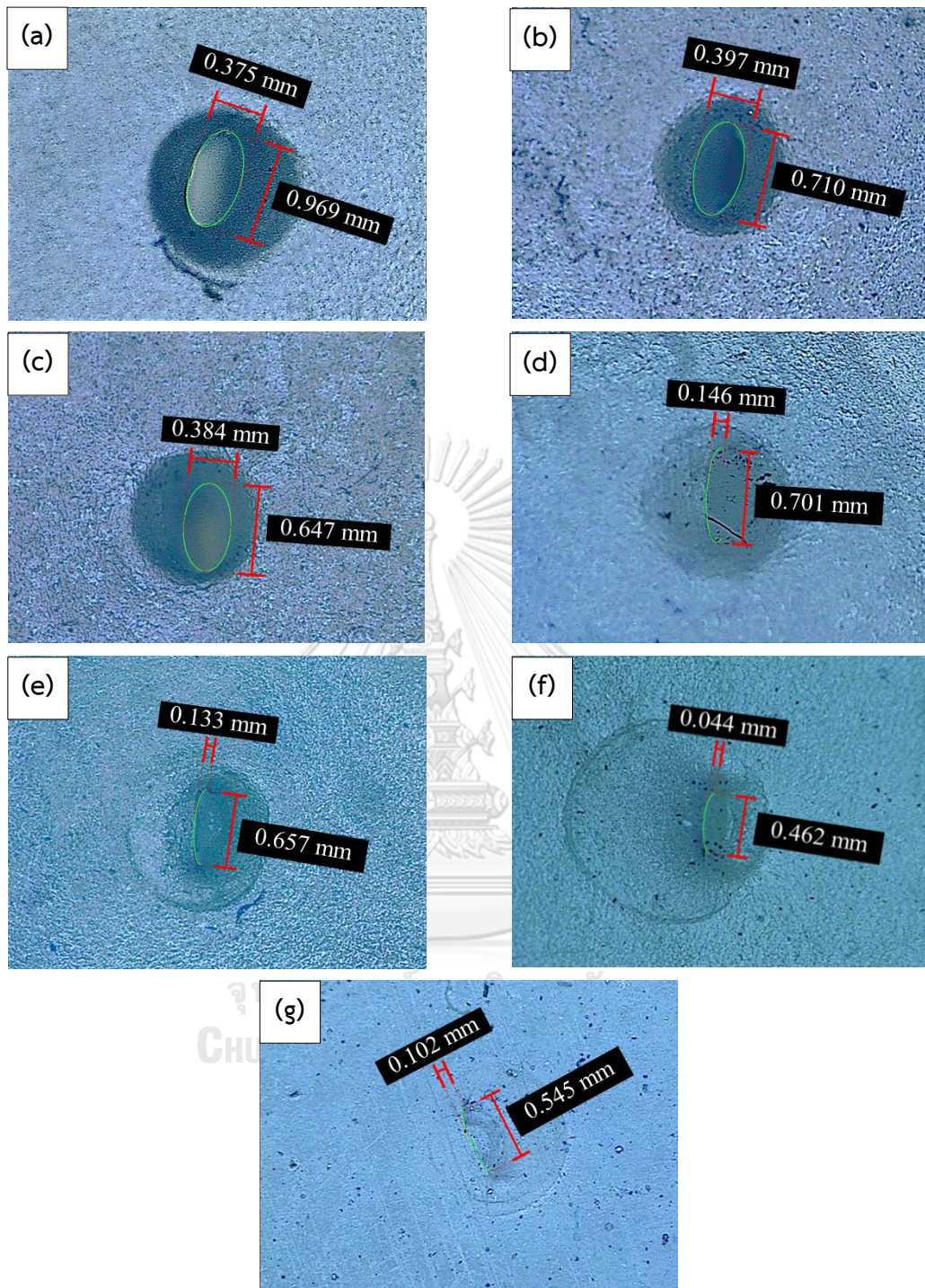
Sample codes	สีของน้ำในหลอดทดสอบ	ผลการทดสอบ
หลอดควบคุม	ใส ไม่มีสี	ผ่าน
B65P35 (หลอด A)	สีน้ำเงินเข้ม	ไม่ผ่าน
B65P30E5 (หลอด B)	สีน้ำเงินเข้ม	ไม่ผ่าน
B65P25E10 (หลอด C)	สีน้ำเงินเข้ม	ไม่ผ่าน
B65P20E15 (หลอด D)	สีฟ้าอ่อน	ไม่ผ่าน
B65P10E25 (หลอด E)	ใส ไม่มีสี	ผ่าน
B65E35 (หลอด F)	ใส ไม่มีสี	ผ่าน
B65P20E15 TPV (หลอด G)	ใส ไม่มีสี	ผ่าน

ตารางที่ 4.7 ขนาดรูของขึ้นตัวอย่างหลังทดสอบการรั่วหลังแทงเข็ม

Sample codes	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เกิดขึ้น (mm)	
	แกน X	แกน Y
B65P35	0.385 ± 0.01	0.857 ± 0.12
B65P30E5	0.383 ± 0.01	0.829 ± 0.11
B65P25E10	0.376 ± 0.01	0.727 ± 0.08
B65P20E15	0.182 ± 0.03	0.682 ± 0.04
B65P10E25	0.118 ± 0.02	0.623 ± 0.08
B65E35	0.078 ± 0.03	0.429 ± 0.04
B65P10E25 TPV	0.104 ± 0.01	0.602 ± 0.07

#### 4.4 ความสามารถในการซึมผ่านแก๊ส

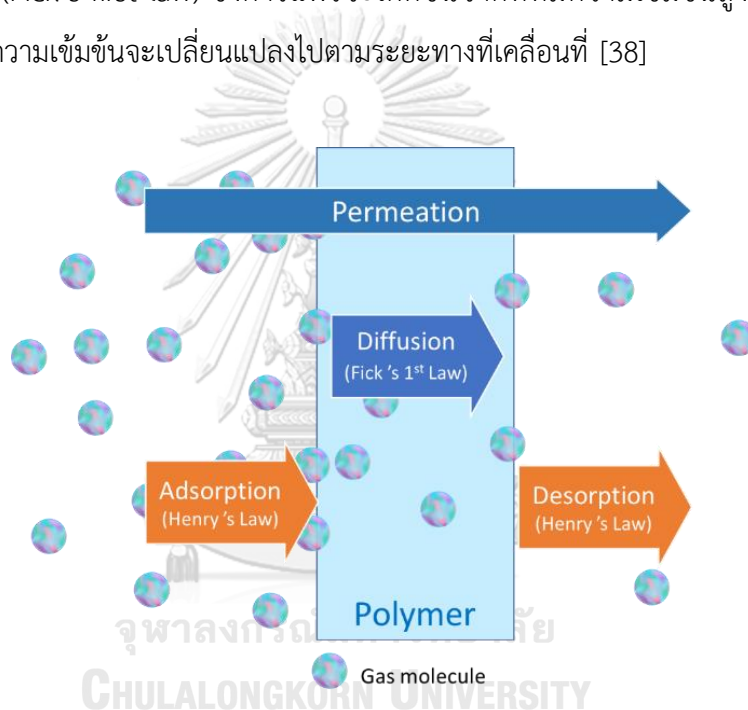
สมบัติการซึมผ่านแก๊สของตัวอย่างแต่ละสูตรจะถูกทดสอบโดยเครื่อง Gas permeability tester ตามมาตรฐาน ASTM D1434 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราการซึมผ่านแก๊สของตัวอย่าง และเป็นการประเมินความสามารถในการรักษาความสุญญากาศเบื้องต้นก่อนจะนำไปใช้ผลิตเป็นลูกปิดหลอดเก็บเลือด การทดสอบนี้จะทดสอบที่อุณหภูมิ 23°C และจำลองภาวะด้านในของเครื่องทดสอบให้มีความดันแต่ละด้านที่สัมผัสกับตัวอย่างแตกต่างกัน และวัดปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ซึมผ่านตัวอย่างจนถึงจุดที่ความดันของห้องทดสอบด้านบนและด้านล่างสมดุลกัน ผลทดสอบที่ได้จะถูกคำนวณออกมาเป็นอัตราการซึมผ่านแก๊ส (Gas transmission rate, GTR) ที่มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot 0.1\text{MPa}$  ซึ่งค่าพารามิเตอร์นี้จะวัดปริมาณแก๊สที่ซึมผ่านตามขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งจะได้พิจารณาถึงความหนาของขึ้นทดสอบ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient, P) จะวัดปริมาณแก๊สที่ซึมผ่านตัวอย่างตามขนาดพื้นที่หน้าตัดและความหนาของตัวอย่างทดสอบในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จะมีหน่วยเป็น  $\text{cm}^3 \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot 0.1\text{MPa}$  นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (Diffusion coefficient, D) มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^2/\text{s}$  ซึ่งค่า D จะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของโมเลกุลแก๊สที่แพร่ และค่าสัมประสิทธิ์การละลาย (Solubility coefficient, S) หน่วยเป็น



รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายรูที่เกิดขึ้นหลังแทงเข็มบนเครื่องวัดขนาดชนิดแสงเงาของตัวอย่าง (a) B65P35, (b) B65P30E5, (c) B65P25E10, (d) B65P20E15, (e) B65P10E25, (f) B65E35 และ (g) B65P10E25 TPV ที่กำลังขยาย 2x

เป็น  $\text{cm}^3/\text{cm}^3\cdot\text{Pa}$  ซึ่งแสดงปริมาณของแก๊สที่ละลายอยู่ในชั้นของพอลิเมอร์ ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะแปรผันตามความสามารถในการซึมผ่านแก๊สของวัสดุนั้น ๆ กล่าวคือวัสดุที่ยอมให้แก๊สซึมผ่านได้มาก จะมีค่า GTR, P, D และ S สูง

กลไกการซึมผ่านของโมเลกุลแก๊สผ่านพอลิเมอร์สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการแพร่และการดูดซับ ดังรูปที่ 4.14 โดยโมเลกุลแก๊สจะถูกดูดซับที่พื้นผิวของพอลิเมอร์กฎการละลายของ Henry (Henry's Law) จากนั้นโมเลกุลแก๊สจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นของพอลิเมอร์ตามหลักการแพร่ ถ้าการแพร่เป็นแบบสถานะคงตัว (Steady state) คือ ความเข้มข้นไม่ขึ้นกับเวลา จะเป็นการแพร่ตามกฎข้อที่หนึ่งของ Fick (Fick's first law) ซึ่งการแพร่จะเกิดขึ้นจากที่ที่มีความเข้มข้นสูงไปยังที่ที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยความเข้มข้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางที่เคลื่อนที่ [38]

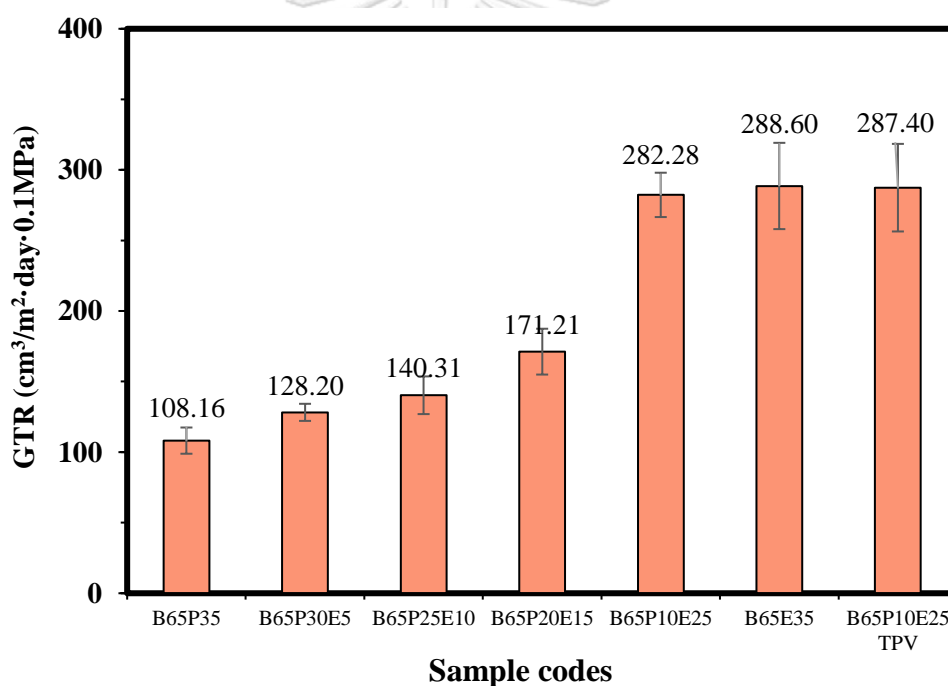


รูปที่ 4.14 กลไกการซึมผ่านของโมเลกุลแก๊สผ่านพอลิเมอร์ [38]

รูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.8 แสดงค่า GTR, P, D และ S ของตัวอย่างแต่ละสูตร พบว่าตัวอย่างที่มีปริมาณสัดส่วนของ EOC เพิ่มขึ้น จะมีค่า GTR และ P สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านแก๊สลดลง ในขณะที่ตัวอย่างที่มีปริมาณ PP ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ค่า GTR และ P ของวัสดุจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline region) ในโครงสร้างของ PP มีปริมาณมากกว่า EOC ซึ่งบริเวณนี้สายโซ่โมเลกุลจะมีการจัดเรียงตัวที่แน่นและมีปริมาตรอิสระ (Free volume) ภายในโครงสร้างต่ำกว่าส่วนอสัณฐาน (Amorphous region) ส่วนที่เป็นผลึกนี้จะทำหน้าที่ในการกั้นการแพร่ผ่าน (Impermeable barriers) ของโมเลกุลแก๊ส จึงทำให้



ต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านเฟสของ PP นานขึ้น ในขณะที่เฟส EOC มีสัดส่วนปริมาณ (Volume fraction) ของส่วนอสัณฐานอยู่มาก ทำให้มี Free volume ในโครงสร้างมาก โมเลกุลแก๊สจึงสามารถแทรกตัวผ่านได้ง่าย [42] เมื่อพิจารณาค่า D พบว่าตัวอย่างที่มีสัดส่วนการผสม EOC มากขึ้น จะมีค่า D สูงขึ้น เนื่องจากค่า D จะแปรผันตามค่า GTR และ P ของพอลิเมอร์เบลนด์ นอกจากความสามารถในการซึมผ่านแก๊สจะขึ้นอยู่กับปริมาณส่วนที่เป็นผลึกและการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์แล้ว ยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์กับแก๊สหรือตัวกลางที่แพร่ผ่านด้วย ซึ่งค่า S ของตัวอย่างแต่ละสูตรพบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของ BIIR, PP และ EOC มีความไม่มีขั้วและประกอบด้วยโครงสร้างสายไฮโดรคาร์บอนที่มีความคล้ายคลึงกัน โดยค่า S ของตัวอย่างทั้งหมดที่ทดสอบได้จะมีค่าอยู่ในช่วง  $7.87 - 10.62 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{cm}^3\cdot\text{Pa}$



รูปที่ 4.15 ค่า GTR ของตัวอย่างพอลิเมอร์เบลนด์ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และ B65P10E25 TPV

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน หรือค่า P ของตัวอย่างแต่ละสูตรเปรียบเทียบกับค่า P ที่ถูกกำหนดไว้ในเอกสารสิทธิบัตร (Patent Document) เลขที่ EP1541482A1 โดยกล่าวถึงสมบัติการป้องกันการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของจุกปิด (Stoppers) ที่ทำจากพลาสติก หรือ TPE สำหรับใช้ปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ต้องป้องกันการซึมผ่านของอากาศที่ดี โดยจะต้องมีค่า P ต่ำกว่า 4,000

$\text{cm}^3 \cdot \text{mm} / \text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot 0.1 \text{MPa}$  คำนวณตามมาตรฐาน ASTM D1434 [45] เพื่อให้สามารถรักษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้ตามอายุการจัดเก็บ หรือ อายุการใช้งาน ดังนั้นตัวอย่างที่เตรียมได้ทุกสูตรทั้งพอลิเมอร์เบส BIR:PP:EOC และ TPV จึงมีค่า P ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานที่ระบุไว้

ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ P, D และ S ของตัวอย่างแต่ละสูตร

Sample codes	Permeability	Diffusion	Solubility
	coefficient (P)	coefficient (D)	coefficient (S)
	$(\text{cm}^3 \cdot \text{mm} / \text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot 0.1 \text{MPa})$	$\times 10^{-8} (\text{cm}^2 / \text{s})$	$\times 10^{-7} (\text{cm}^3 / \text{cm}^3 \cdot \text{Pa})$
B65P35	$55.52 \pm 5.45$	$8.08 \pm 0.74$	$7.87 \pm 0.78$
B65P30E5	$68.58 \pm 2.21$	$8.40 \pm 0.47$	$9.36 \pm 0.85$
B65P25E10	$81.54 \pm 6.68$	$10.64 \pm 0.37$	$8.75 \pm 0.58$
B65P20E15	$96.68 \pm 7.66$	$13.15 \pm 0.38$	$8.39 \pm 0.50$
B65P10E25	$145.32 \pm 9.39$	$15.65 \pm 0.39$	$10.62 \pm 0.92$
B65E35	$167.55 \pm 17.36$	$20.33 \pm 2.83$	$9.46 \pm 0.78$
B65P10E25 TPV	$151.81 \pm 12.32$	$17.48 \pm 0.75$	$9.91 \pm 0.43$

#### 4.5 การวิเคราะห์ต้นทุน

การพิจารณาต้นทุนของวัตถุดิบและกระบวนการผลิตใหม่เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบในกระบวนการผลิต ทำให้ส่งผลต่อราคาต้นทุนใหม่ของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำเสนอการคิดต้นทุนการผลิตจุกปิดหลอดเก็บเลือดจากยางเทอร์โมเซตและ TPV ดังตารางที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ โดยจะคิดเป็นราคาต้นทุนสูตรในหน่วยบาทต่อปริมาตร (ลิตร) เนื่องจากความหนาแน่นของสูตรยางเทอร์โมเซตและ TPV แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.11 แสดงต้นทุนการผลิตจุกปิดหลอดเก็บเลือด โดยเปรียบเทียบระหว่างยางเทอร์โมเซตที่เป็นสูตรที่ทางอุตสาหกรรมใช้อยู่ปัจจุบันและ TPV ที่พัฒนาขึ้นในงานนี้ พบว่าต้นทุนของจุกปิดหลอดเก็บเลือดจากยางเทอร์โมเซตเป็น 16.12 บาทต่อชิ้น ในขณะที่ต้นทุนของจุกปิดหลอดเก็บเลือดจาก TPV เป็น 9.95 บาทต่อชิ้น ซึ่งต้นทุนที่ลดลงจากเดิมคิดเป็น 6.17 บาทต่อชิ้น หรือคิดเป็น 38% ของต้นทุนเดิม จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการใช้ TPV เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตจุกปิดหลอดเก็บเลือดสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบและค่าใช้จ่ายในการผลิตลงได้

ตารางที่ 4.9 ราคาต้นทุนสูตรจุกปิดหลอดเก็บเลือดจากยางเทอร์โมเซต

วัตถุดิบและสารเคมี	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)	สัดส่วนการผสม (phr)
BIIR (BB 2030)	0.93	175	100
Nucap <sup>®</sup> 290W <sup>a</sup>	2.6	80	80
Stearic acid	0.941	68	1.0
MgO	3.5	15	5.8
White oil	0.83	300	8.0
VULTAC <sup>®</sup> TB 710 <sup>b</sup>	0.8	240	1.0
Sulfur	2.08	17	0.3
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )		1.288	
ราคาต้นทุนสูตร (บาทต่อกิโลกรัม)		136.16	
ราคาต้นทุนสูตร (บาทต่อลิตร)		175.37	

<sup>a</sup> Silane treated clay

<sup>b</sup> Mixture of poly-tert-butylphenoldisulfide and stearic acid

ตารางที่ 4.10 ราคาต้นทุนสูตรจุกปิดหลอดเก็บเลือดจาก TPV

วัตถุดิบและสารเคมี	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)	สัดส่วนการผลิต (phr)
BIIR (BB 2030)	0.93	175	65
PP (RP348N)	0.90	38	10
EOC (8613L)	0.863	80	25
DCP	1.11	88.50	1.5
TMPTMA	1.05	378.50	1.0
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )		0.896	
ราคาต้นทุนสูตร (บาทต่อกิโลกรัม)		139.18	
ราคาต้นทุนสูตร (บาทต่อลิตร)		124.71	

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจุกปิดหลอดเก็บเลือดจากยางเทอร์โมเซตและ TPV

ค่าใช้จ่ายในการผลิต (บาทต่อแบตช์)	จุกปิดยางเทอร์โมเซต	จุกปิด TPV
ราคาวัตถุดิบ	67	52
ค่าแรงงานทางตรง (54.97 บาทต่อชั่วโมง)*	128.1	73.1
ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต		
ค่าเสื่อมเครื่อง ค่าพื้นที่ และค่าไฟฟ้า*	70.85	70.85
ค่าติดตั้งแม่พิมพ์*	495	495
ค่าบำรุงรักษาแม่พิมพ์*	250	250
ค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบ*	20.9	14.0
รวมต้นทุนทั้งหมด	1,031.85	954.95
จำนวนชิ้นที่ผลิตได้ (บาทต่อแบตช์)	64	96
ราคาต้นทุนจุกปิด (บาทต่อชิ้น)	16.12	9.95

\* ข้อมูลอ้างอิงตามการคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตของบริษัท เอส.เค. โพลีเมอร์ จำกัด



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสมบัติความแข็งที่อัตราส่วนผสม BIIR:PP:EOC เป็น 65:35:0, 65:30:5, 65:25:10, 65:20:15, 65:10:25 และ 65:0:35 พบว่าอัตราส่วน B65P10E25 มีค่าความแข็งเท่ากับ 43 Shore A ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ค่าความแข็งของจุกปิดหลอดเก็บเลือด จึงได้เลือกอัตราส่วนนี้มาเตรียมเป็น TPV โดยผสมสารวัลคาไนซ์ไดควิมิลเพอร์ออกไซด์ 1.5 wt% และสารโคเอเจนต์ไตรเมทิลอลโพรเพนไตรเมทาอะคริเลท 1 wt% จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ พบว่า TPV ที่เตรียมได้มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 45 Shore A ส่วนความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด ระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงฉีกขาดมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ B65P10E25 ที่ไม่มีสารวัลคาไนซ์ (B65P10E25) นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงสมบัติการคืนตัวหลังถูกกดที่ตีขึ้น โดยแสดงเปอร์เซ็นต์การยุบตัวหลังได้รับแรงกดเป็น 21.83% ซึ่งค่าที่ได้นี้อยู่ในค่าที่กำหนดตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์

ภาพ SEM ของ BIIR:PP:EOC ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ชี้ให้เห็นว่าการเติม EOC ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น จะช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้และการกระจายตัวของเฟส BIIR และ PP นอกจากนี้ยังช่วยส่งเสริมการพัฒนาสัญญาณวิทยาของ B65P10E25 TPV ในขณะที่เกิดวัลคาไนเซชันจนได้เฟสกระจายที่มีขนาดเล็กลง

การทดสอบความสามารถในการหลอมขึ้นรูปซ้ำของ B65P10E25 TPV พบว่าสามารถนำมาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้หลายครั้ง โดยแสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดและค่าดัชนีความเหลืองเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการหลอมขึ้นรูปซ้ำที่เพิ่มขึ้น

ผลการศึกษาสมบัติการคืนตัวหลังแช่แข็งพบว่ามีค่าสูง B65P10E25, B65E35 และ B65P10E25 TPV สามารถแสดงสมบัติการคืนตัวหลังแช่แข็งที่ดี โดยการผสม EOC ที่ปริมาณมากกว่า 25% สามารถปรับปรุงสมบัติการคืนตัวของวัสดุได้ ส่วนความแตกต่างของขนาดรูหลังแช่แข็งระหว่างพอลิเมอร์เบลนด์ B65P10E25 และ B65P10E25 TPV ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ผลทดสอบอัตราการซึมผ่านแก๊สของตัวอย่างที่เตรียมได้ทั้งหมด พบว่าเมื่อมีปริมาณของ EOC ผสมอยู่มากขึ้น จะส่งผลให้อัตราการซึมผ่านแก๊สของวัสดุสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณสัดส่วนของเฟส PP ที่มีส่วนที่เป็นผลึกลดลง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแก๊สของ B65P10E25 TPV มีค่า

เท่ากับ  $151.81 \text{ cm}^3 \cdot \text{mm} / \text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot 0.1 \text{ MPa}$  โดยผ่านเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นจุกปิดในบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ต้องการการป้องกันการซึมผ่านของอากาศที่ดี

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสามารถเตรียม TPV ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีอัตราการซึมผ่านแก๊สต่ำ สามารถคืนตัวได้หลังจากดึงเข็มออก และผ่านเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นจุกปิดในหลอดเก็บเลือด โดยสรุปผลทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 5.1 นอกจากนี้ TPV ยังสามารถนำมาผ่านกระบวนการหลอมขึ้นรูปซ้ำใหม่ได้ เมื่อนำไปใช้ผลิตเป็นจุกปิดหลอดเก็บเลือดจะมีราคาต้นทุนต่ำกว่า 38% ของต้นทุนจุกปิดจากยางเทอร์โมเซต

**ตารางที่ 5.1** เปรียบเทียบสมบัติของจุกปิดหลอดเก็บเลือดจากเทอร์โมเซตและ TPV ตามมาตรฐานต่าง ๆ ที่กำหนด

สมบัติของผลิตภัณฑ์	ค่ามาตรฐาน	จุกปิดยางเทอร์โมเซต	จุกปิด TPV
Specific gravity ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	-	1.288	0.896
Tensile strength (MPa)	-	10.47	4.48
Elongation at Break (%)	-	764	803
Stress at Modulus 100% (MPa)	-	1.40	0.96
Stress at Modulus 300% (MPa)	-	3.45	2.13
Hardness (Shore A)	40-50	45	45
Tear resistance (N/mm)	-	38.79	20.60
Compression set (%) at 70 °C, 22 hr	< 30	8.41	21.43
Self-sealing test (USP 381)	ไม่พบการรั่วของสีเมทิลีนบลู	ผ่าน	ผ่าน
Gas permeability ( $\text{cm}^3 \cdot \text{mm} / \text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot 0.1 \text{ MPa}$ )	< 4000	-	151.81

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) จากงานวิจัยนี้ที่ศึกษาการเตรียม TPV ที่อัตราส่วน BIIR65:PP10:EOC25 พบว่า TPV ที่ได้มีสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส และสมบัติการคืนตัวหลังแทงเข็มที่ดี โดยผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในผลิตภัณฑ์จุกปิดหลอดเก็บเลือด อีกทั้งยังสามารถนำไป

ผ่านกระบวนการทางความร้อนและขึ้นรูปซ้ำใหม่ได้เหมือนเทอร์โมพลาสติก ดังนั้นผู้วิจัยจึงอยากเสนอให้นำอัตราส่วนผสมนี้ไปพัฒนาต่อยอดเพื่อลดต้นทุนสูตรได้เพิ่มขึ้น โดยการเติมสารตัวเติมเข้าไปผสม อย่างเช่น เคลย์ หรือ ทัลคัม ซึ่งจะช่วยให้ต้นทุนสูตรต่ำลง เนื่องจากราคาของสารตัวเติมเหล่านี้ต่ำกว่ายางโบรโมบิวทิล นอกจากนี้จากงานวิจัยของ G. Naderi และคณะ [46] ศึกษาผลของการเติมสารตัวเติมเคลย์ใน TPV พบว่าสามารถเพิ่มสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับ TPV ที่ไม่มีการเติมเคลย์ เนื่องจากสารตัวเติมกลุ่มนี้มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่น เมื่อผสมอยู่ในพอลิเมอร์หรือยางจะช่วยเพิ่มระยะทางและเวลาในการเคลื่อนที่ของแก๊ส และยังช่วยดูดซับแก๊สประเภทต่าง ๆ และความชื้นไว้ไม่ให้แพร่ผ่านไปยังอีกด้านของวัสดุ นอกจากนี้เคลย์ยังทำหน้าที่เหมือนสารช่วยก่อผลึก (Nucleating agent) ซึ่งจะช่วยให้การเหนี่ยวนำให้พอลิเมอร์ตกผลึกได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งผลึกที่ได้ก็จะมีขนาดเล็กกว่าปกติ ทั้งนี้ปริมาณการเติมสารตัวเติมดังกล่าวควรมีการศึกษาในหลาย ๆ อัตราส่วน เพื่อที่จะได้อัตราส่วนที่เหมาะสมที่ยังทำให้ TPV มีสมบัติต่าง ๆ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ต้องการในจุดปิดหลอดเก็บเลือด

(2) ควรศึกษาการแปรปริมาณสารวัลคาไนซ์และสารโคเอเจนต์ในการเตรียม TPV เพิ่มเติมเพื่อให้ได้สูตรที่สารเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยการศึกษาหาปริมาณพันธะเชื่อมขวางที่อัตราส่วนต่าง ๆ และสมบัติเชิงกลที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น

(3) เนื่องจากการนำไปใช้งานเป็นจุดปิดหลอดเก็บเลือดจะมีอายุการจัดเก็บค่อนข้างนาน จึงควรทดสอบการเสื่อมสลายตามสภาวะการจัดเก็บ ซึ่งมีปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพหรือสมบัติลดลง เช่น อุณหภูมิการจัดเก็บ แสงแดด และความชื้น เป็นต้น

(4) ควรนำสูตรนี้ไปพัฒนาต่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด ซึ่งจะต้องอาศัยสมบัติการไหลที่สูงกว่าการขึ้นรูปแบบกระบวนการอัด ผลที่ได้จะช่วยลดข้อจำกัดในเรื่องของเครื่องมือที่ใช้ขึ้นรูป เนื่องจากในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะใช้กระบวนการแบบฉีดในการขึ้นรูปเป็นส่วนใหญ่ เพราะสามารถผลิตได้ปริมาณครั้งละหลายชิ้นและใช้เวลาสั้นกว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

## บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

- [1] Legge, N. R., Holden, G., & Schroeder, H. E. (1987). *Thermoplastic elastomers: A comprehensive review*. Hanser.
- [2] Mordorintelligence. *Thermoplastic Elastomer Market Share Size 2022 - 2027 Industry Report*. Retrieved March 5, 2022 from <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/thermoplastic-elastomers-tpe-market>
- [3] *Properties of TPEs*. Retrieved January 19, 2021 from <http://polymerdatabase.com/Elastomers/TPEs.html>
- [4] Holden, G. (2000). *Understanding Thermoplastic Elastomers*. Hanser.
- [5] Legge, N. R. (1987). Thermoplastic Elastomers. *60*(3), 83-117. <https://doi.org/10.5254/1.3536141>
- [6] Cao, R., Zhao, X., Zhao, X., Wu, X., Li, X., & Zhang, L. (2019). Bromination Modification of Butyl Rubber and Its Structure, Properties, and Application. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *58*(36), 16645–16653. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b03491>
- [7] พงษ์ธร แซ่อู๋ย (2548). *สารเคมียาง*. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC).
- [8] Butyl rubber (IIR). Retrieved January 19, 2021 from [http://polymerdatabase.com/polymer% 20Brands/Butyl.html](http://polymerdatabase.com/polymer%20Brands/Butyl.html)
- [9] Omnexus. (2018). *Polypropylene (PP) Plastic: Types, Properties, Uses & Structure*. Retrieved July 1, 2022 from <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polypropylene-pp-plastic>
- [10] Maddah, H. A. (2016). Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. 1-11. <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20160601.01>
- [11] Sangir Plastics P. *Polypropylene Piping Systems: General properties of Polypropylene*. Retrieved July 1, 2022 from <http://www.sangir.in>
- [12] Babu, R. R., Singha, N. K., & Naskar, K. (2009). Melt viscoelastic properties of peroxide cured polypropylene-ethylene octene copolymer thermoplastic vulcanizates. *Polymer Engineering & Science*, *50*(3), 455-467. <https://doi.org/10.1002/pen.21553>

- [13] Tesarikova, A., Merinska, D., Kalous, J., & Svoboda, P. (2016). Ethylene-Octene Copolymers/Organoclay Nanocomposites: Preparation and Properties. *Journal of Nanomaterials*, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2016/6014064>
- [14] พรพรรณ นิธิอุทัย. (2540). ยาง: เทคนิคการออกสูตร. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- [15] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย และชาคริต สิริสิงห. (2550). ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [16] Dick, J. S. (2001). *Rubber Technology : Compounding and testing for performance*. Hanser.
- [17] Thitithammawong, A., Nakason, C., Sahakaro, K., & Noordermeer, J. W. M. (2008). Multifunctional peroxide as alternative crosslink agents for dynamically vulcanized epoxidized natural rubber/polypropylene blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 111, 819. <https://doi.org/10.1002/app.29129>
- [18] Naskar, K. (2010). *Dynamically vulcanized PP/EPDM thermoplastic elastomers : pros and cons of perocides as crosslinking agents*. Lap Lambert Academic Publishing.
- [19] Kruželák, J., Sýkora, R., & Hudec, I. (2017). Vulcanization of Rubber Compounds with Peroxide Curing Systems. *Rubber Chemistry and Technology*, 90(1), 60–88. <https://doi.org/10.5254/rct.16.83758>
- [20] Kruželák, J., Sýkora, R., & Hudec, I. (2014). Influence of mixed sulfur/peroxide curing system and thermo-oxidative ageing on the properties of rubber magnetic composites. *Journal of Polymer Research*, 22(1). <https://doi.org/10.1007/s10965-014-0636-8>
- [21] Datta, S. K., Chaki, T. K., Tikku, V. K., Pradhan, N. K., & Bhowmick, A. K. (1997). Heat shrinkage of electron beam modified EVA. *Radiation Physics and Chemistry*, 50(4), 399–405. [https://doi.org/10.1016/s0969-806x\(97\)00034-0](https://doi.org/10.1016/s0969-806x(97)00034-0)
- [22] Yao, P., Wu, H., Ning, N., Zhang, L., Tian, H., Wu, Y., Hu, G., Chan, T. W., & Tian, M. (2016). Properties and unique morphological evolution of dynamically vulcanized bromo-isobutylene-isoprene rubber/polypropylene thermoplastic

- elastomer. *RSC Advances*, 6(14), 11151-11160.  
<https://doi.org/10.1039/c5ra26171f>
- [23] Svoboda, P., Theravalappil, R., Svobodova, D., Mokrejs, P., Kolomaznik, K., Mori, K., Ougizawa, T., & Inoue, T. (2010). Elastic properties of polypropylene/ethylene–octene copolymer blends. *Polymer Testing*, 29(6), 742-748. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.05.014>
- [24] Choi, M. C., Jung, J.-Y., & Chang, Y.-W. (2014). Shape memory thermoplastic elastomer from maleated polyolefin elastomer and nylon 12 blends. *Polymer Bulletin*, 71(3), 625-635. <https://doi.org/10.1007/s00289-013-1081-2>
- [25] Rocha, M. C. G., Leyva, M. E., & Oliveira, M. G. (2014). Thermoplastic elastomers blends based on linear low density polyethylene, ethylene-1-octene copolymers and ground rubber tire. *Polímeros Ciência e Tecnologia*, 24(1), 23-29. <https://doi.org/10.4322/polimeros.2014.033>
- [26] Babu, R. R., Singha, N. K., & Naskar, K. . (2011). Interrelationships of morphology, thermal and mechanical properties in uncrosslinked and dynamically crosslinked PP/EOC and PP/EPDM blends. *Express Polymer Letters*, 4(4), 197-209. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2010.26>
- [27] Yan, X., Xu, X., & Zhu, L. (2007). Analysis of brittle–ductile transition of polypropylene/ethylene-octene copolymer blends by scanning electron microscopy and small angle laser light scattering. *Journal of Materials Science*, 42(20), 8645–8651. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1882-5>
- [28] Arzondo, L. M., Pino, N., Carella, J. M., Pastor, J. M., Merino, J. C., Póveda, J., & Alonso, C. (2004). Sequential injection overmolding of an elastomeric ethylene-octene copolymer on a polypropylene homopolymer core. *Polymer Engineering & Science*, 44(11), 2110-2116. <https://doi.org/10.1002/pen.20216>
- [29] Cao, R., Zhao, X., Zhao, X., Wu, X., Li, X., & Zhang, L. (2019). Bromination Modification of Butyl Rubber and Its Structure, Properties, and Application. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(36), 16645–16653.  
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b03491>
- [30] Rattanasom, N., Prasertsri, S., & Suchiva, K. (2009). Mechanical properties, thermal stability, gas permeability, and phase morphology in natural

- rubber/bromobutyl rubber blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 113, 3985-3992. <https://doi.org/10.1002/app.30451>
- [31] Omnexus. *X\_Butyl® BB 2030*. Retrieved July 3, 2022 from <https://omnexus.specialchem.com/product/r-arlaxeo-x-butyl-bb-2030>
- [32] HMC Polymers. *Moplen RP348N*. Retrieved July 15, 2022 from <https://www.hmcpolymers.com/products/rp348n>
- [33] SK innovation Global Technology. *Solumer™ 8613L*. Retrieved July 1, 2022 from <https://nortex-chem.ru/133.pdf>
- [34] *Dumbbell shape for testing*. Retrieved December 21, 2020 from [http://www.dumbbell.co.jp/english/super\\_dumbbell01.html](http://www.dumbbell.co.jp/english/super_dumbbell01.html)
- [35] CAE. *JEOL-JSM 6480L*. Retrieved May 31, 2022 from <https://caeonline.com/about-cae>
- [36] 3nh. *Colorimeter Model NR110*. Retrieved January 31, 2022 from <http://www.3nhid.com/Products/Colorimeter/NR110.html>
- [37] Labthink. *VAC-V2 Gas Permeability Tester*. Retrieved May 31, 2022 from <https://www.labthinkinternational.com/en-us/product/vac-v2-gas-permeability-tester.html>
- [38] Maes, C., te Molder, M., Luyten, W., Herremans, G., Winckelmans, N., Peeters, R., Carleer, R., & Buntinx, M. (2021). Determination of the nitrogen gas transmission rate (N2GTR) of ethylene vinyl alcohol copolymer, using a newly developed permeation measurement system. *Polymer Testing*, 93, 106979. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106979>
- [39] Varghese, S., Alex, S., & Kuriakose, B. (2004). Natural rubber isotactic polypropylene thermoplastic blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 92, 2063-2068. <https://doi.org/10.1002/app.20077>
- [40] Harrats, S., Thomas, S., & Groeninckx, G. (2006). *Micro and nano structured multiphase polymer blend systems: Phase morphology and interface*. Boca Raton.
- [41] Lim, K. H., Majid, M. S. A., Ridzuan, M. J. M., Basaruddin, K. S., & Afendi, M. (2017). Effect of nano-clay fillers on mechanical and morphological properties



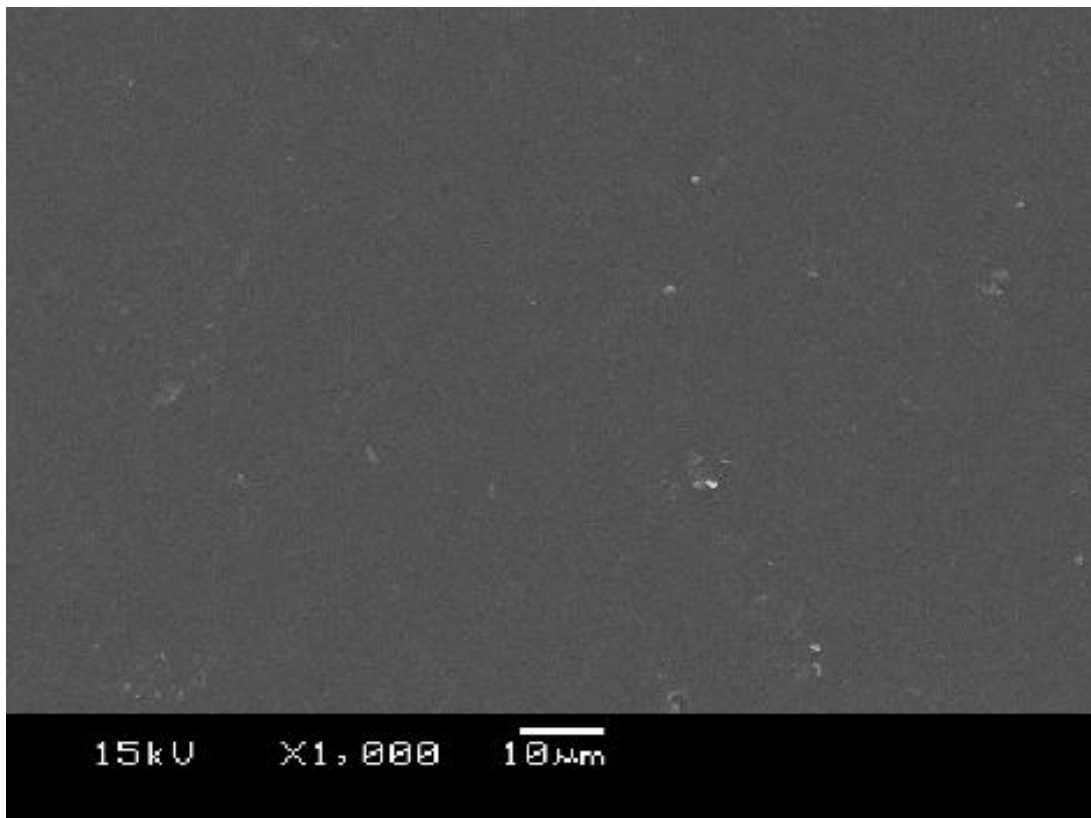
- of Napier/epoxy Composites. *Journal of Physics: Conference Series*, 908, 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/908/1/012010>
- [42] Qi, L., Wu, L., He, R., Cheng, H., Liu, B., & He, X. (2019). Synergistic toughening of polypropylene with ultra-high molecular weight polyethylene and elastomer-olefin block copolymers. *RSC Advances*, 9, 23994-24002. <https://doi.org/10.1039/C9RA01073D>
- [43] Sanchez, C. G., Aguirre, A.M., Garcia, B.P., Acosta, J., Valero, C.F., Ordan, M.U., Sanchez, C., & Urreaga, J. M. (2016). Enhancement of Mechanical Properties of Waste-Sourced Biocomposites through Peroxide induced Crosslinking. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 80, 285-291. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.032>
- [44] Breuer, J., Metev, S., & Sepold, G. (1995). Photolytic surface modification of polymers with UV-laser radiation. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 9(3), 351-363. <https://doi.org/10.1163/156856195X00545>
- [45] Roberto, C. (2005). *Low permeability device for closure of* (European Patent No. EP1541482A1).
- [46] Naderi, G., Lafleur, P. G., & Dubois, C. (2007). Microstructure-properties correlations in dynamically vulcanized nanocomposite thermoplastic elastomers based on PP/EPDM. *Polymer Engineering & Science*, 47(3), 207–217. <https://doi.org/10.1002/pen.20673>



ภาคผนวก

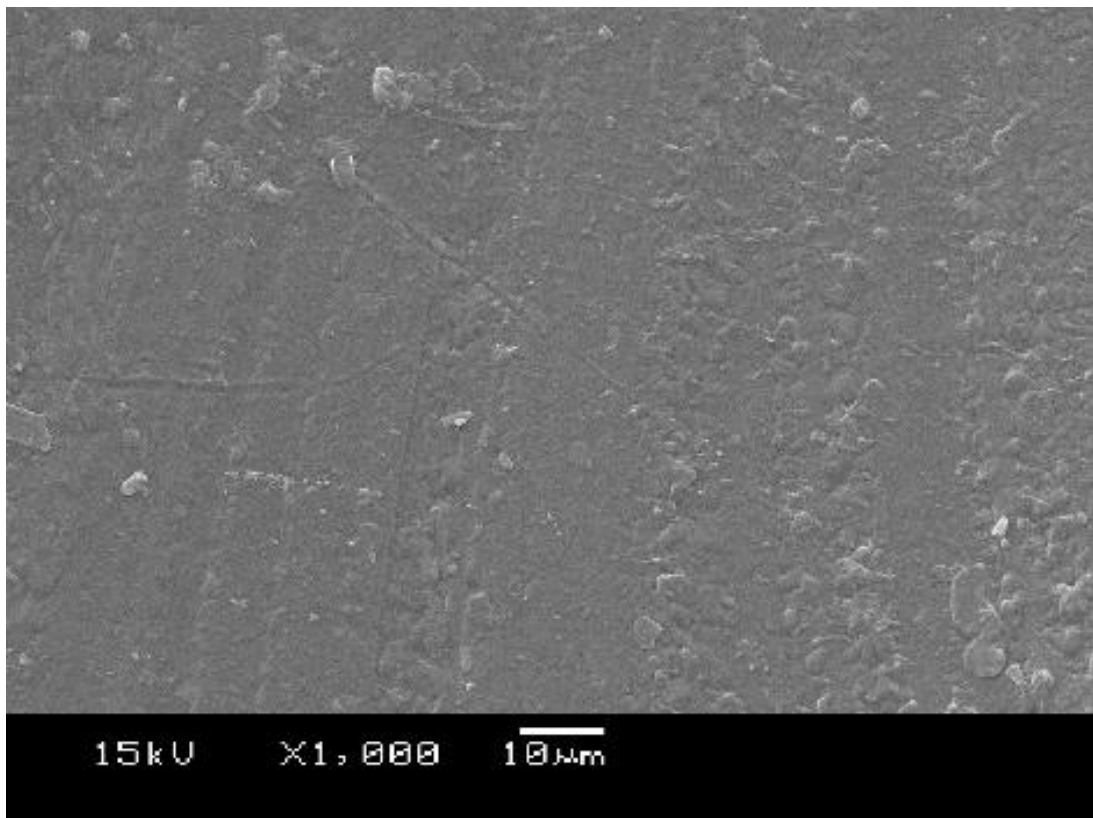
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



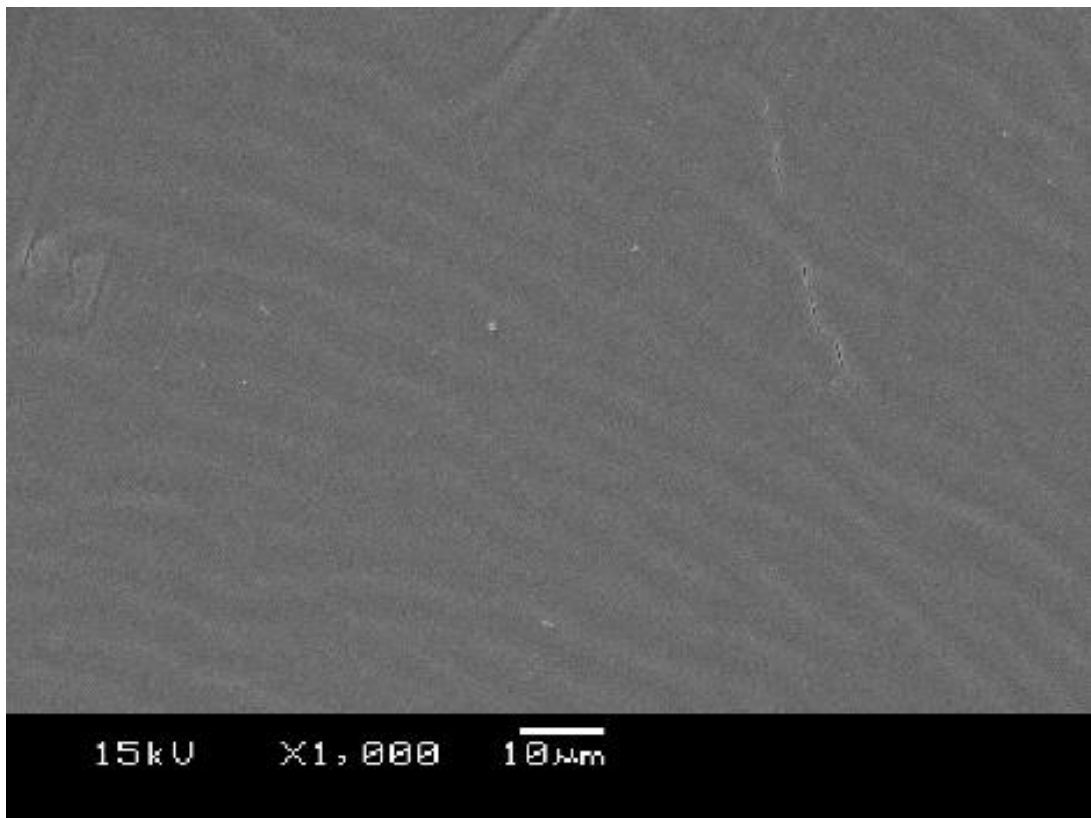


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.1 ภาพ SEM ของ Neat BIIR ที่กำลังขยาย 1000x



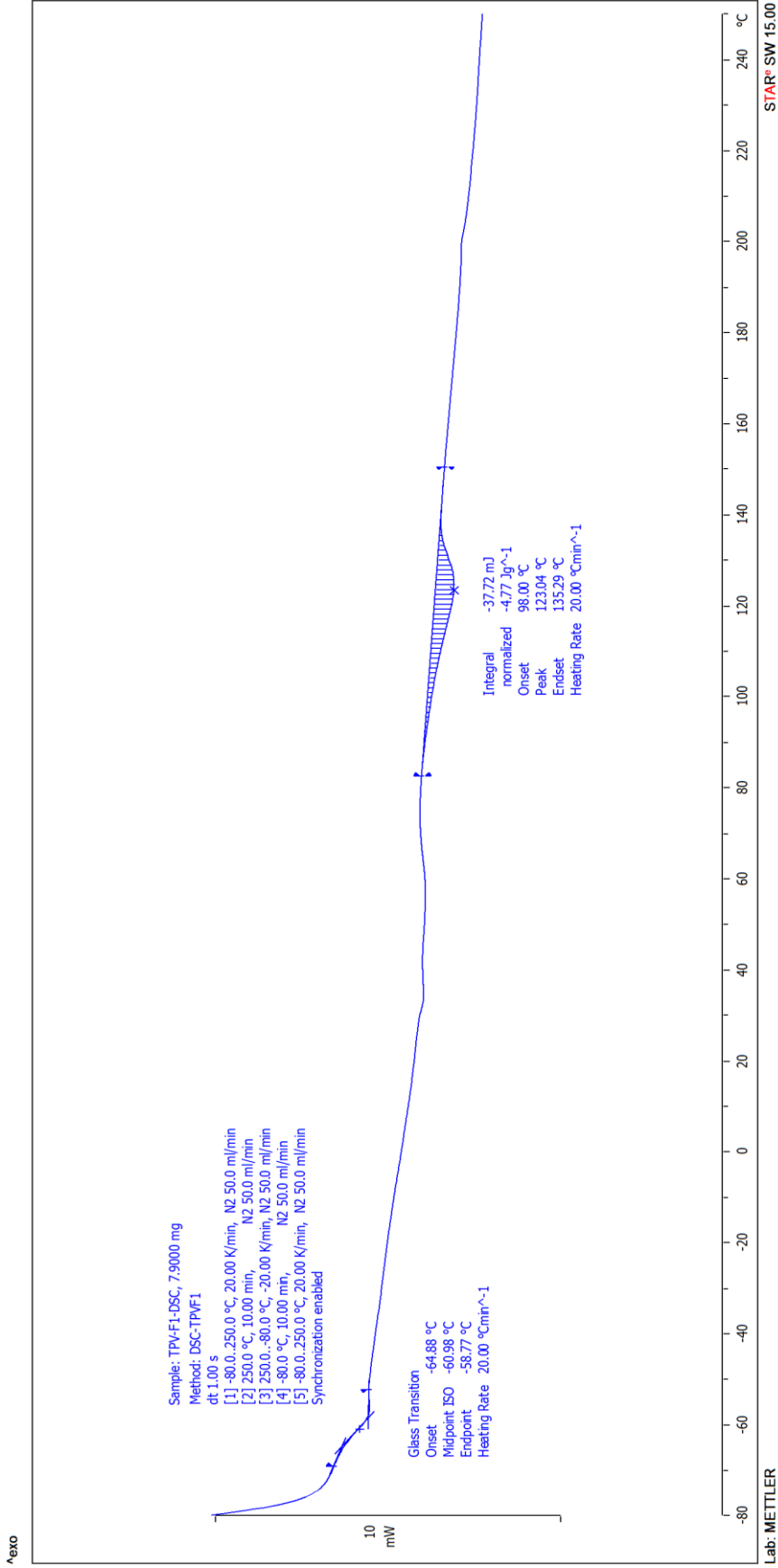
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
รูปที่ ก.2 ภาพ SEM ของ Neat PP ที่กำลังขยาย 1000x



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.3 ภาพ SEM ของ Neat EOC ที่กำลังขยาย 1000x

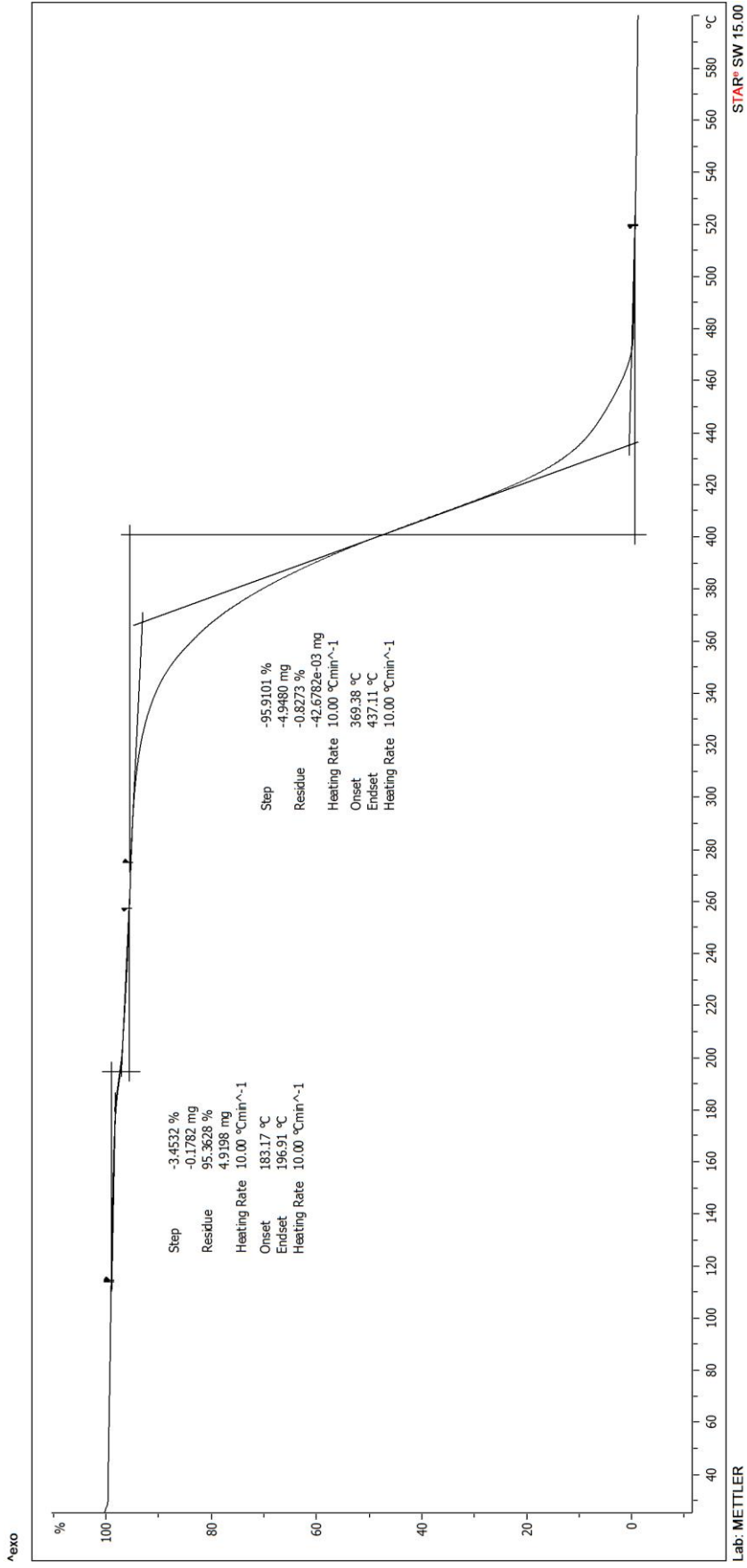




รูปที่ ข.1 กราฟ DSC ของตัวอย่าง B65P10E25 TPV







รูปที่ ค.1 กราฟ DSC ของตัวอย่าง B65P10E25 TPV

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สุพรรณษา คุณขยัน
วัน เดือน ปี เกิด	9 กรกฎาคม 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีวัสดุพอลิเมอร์ คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	243 ถ.หมู่บ้านเศรษฐกิจ แขวงบางแคเหนือ เขตบางแค กทม. 10160
ผลงานตีพิมพ์	S. Khunkayan, S. Saithong, K. Boonkerd and Poompradub, "Preparation and properties of thermoplastic elastomer based on bromobutyl rubber and polypropylene", Pure and Applied Chemistry International Conference 2022 (PACCON 2022), Bangkok, Thailand, June 30 – July 1, 2022, (Poster)